

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра автоматизации производственных процессов

А.Г. Гороховский
Е.Е. Шишкина
В.В. Савина

СУШКА ДРЕВЕСИНЫ. СБОРНИК ЗАДАЧ

Методические указания
для практических работ по курсу
«Тепловая обработка и сушка древесины»
для студентов направления 250400.62
«Технология лесозаготовительных
и деревоперерабатывающих производств»
очной и заочной форм обучения

Екатеринбург
2013

Печатается по рекомендации методической комиссии ИЛБидС.
Протокол № 1 от 3 октября 2012 г.

Рецензент – заведующий кафедрой МОД, канд. техн. наук,
доцент О.Н. Чернышев

Редактор К.В. Корнева
Оператор компьютерной верстки Т.В. Упорова

Подписано в печать 25.12.2013		Поз. 15
Плоская печать	Формат 60×84 ¹ / ₁₆	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 3,25	Цена руб. коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА КАК АГЕНТА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ	5
2. <i>Id</i> -ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	7
Процессы изменения состояния воздуха во время сушки	8
3. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА В КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛКАХ	12
Практические задания	15
Задача 1	15
Задача 2	16
Задача 3	17
Задача 4	18
Задача 5	19
Задача 6	20
Задача 7	21
Задача 8	22
Задача 9	23
4. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ	24
Практические задания	28
Задача 10	28
Задача 11	29
5. ВЫБОР РЕЖИМА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ	30
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ	30
7. ПЕРЕСЧЕТ ОБЪЕМА ФАКТИЧЕСКОГО ПИЛОМАТЕРИАЛА В ОБЪЕМ УСЛОВНОГО МАТЕРИАЛА	31

8. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР	34
Практические задания	35
Задача 12	35
Задача 13	35
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	42
Приложение 1. Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры	42
Приложение 2. <i>Id</i> -диаграмма влажного воздуха	44
Приложение 3. Диаграмма равновесной влажности	45
Приложение 4. Коэффициенты усушки и разбухания древесины.....	46
Приложение 5. Диаграмма плотности древесины.....	46
Приложение 6. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны, ели, пихты, кедра	47
Приложение 7. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины лиственницы.....	48
Приложение 8. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины березы	49
Приложение 9. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины ольхи, липы, тополя	50
Приложение 10. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины осины	51
Приложение 11. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины клена, бука.....	51
Приложение 12. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины ясеня, ильма.....	52
Приложение 13. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины дуба, граба и ореха.....	52
Приложение 14. Исходная продолжительность сушки пиломатериалов $\tau_{исх}$ в камерах периодического действия при низкомолекулярном процессе	53

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания предназначены для практических работ студентов по курсу «Тепловая обработка и сушка древесины» (направление 250400.62 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств»).

Издание содержит 8 подразделов, в части из которых даны практические задания – задачи для самостоятельного решения. Методические указания дополнены тематическими таблицами (прил. 1–14).

1. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА КАК АГЕНТА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Для гидротермической обработки древесины часто используют атмосферный воздух. В воздухе всегда присутствует какое-то количество влаги в виде водяного пара. Смесь сухого воздуха с водяным паром принято называть **влажным воздухом**.

Важным параметром, характеризующим состояние влажного воздуха, является парциальное давление водяного пара. **Парциальное давление компонента в смеси газов** – это давление, которое имел бы данный компонент при удалении из объема, занимаемого смесью, всех остальных газов.

Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе не может быть больше давления насыщения при данной температуре, то есть $p_n \leq p_n$.

Воздух, который содержит насыщенный водяной пар ($p_n = p_n$), называют **насыщенным паром воздухом**. Воздух, для которого выполняется неравенство $p_n < p_n$, называется **ненасыщенным**.

Для оценки количества влаги, присутствующей в воздухе, используют следующие параметры: абсолютную влажность (ρ_n), относительную влажность (ϕ) и влагосодержание (d).

Абсолютная влажность – это масса водяного пара, содержащаяся в единице объема влажного воздуха, кг/м³.

Учитывая, что влажный воздух представляет собой смесь газов, то объем пара в смеси равен объему всей смеси. Следовательно, абсолютная влажность может быть определена как плотность водяного пара в воздухе, кг/м³:

$$\rho_n = \frac{M_n}{V} = \frac{M_n}{V_n}, \quad (1)$$

где M_n – масса пара в воздухе, кг;

V и V_n – объем влажного воздуха и пара в воздухе, м³.

Известно, что сухой насыщенный и перегретый пар при невысоком давлении ($p < 0,1$ МПа) близок по своим свойствам к идеальным газам.

Таким образом, его параметры с достаточной для технических расчетов точностью определяются по уравнению Менделеева–Клапейрона.

$$p_n v_n = R_n T, \quad (2)$$

где p_n – давление пара, Па;

v_n – молярный объем;

R_n – газовая постоянная водяного пара, равная 461,58 Дж/(кг·К);

T – температура пара, К.

Учитывая, что плотность является величиной, обратной удельному объему, из формулы (2) может быть получено выражение для расчета абсолютной влажности, кг/м³:

$$\rho_n = \frac{p_n}{R_n T}. \quad (3)$$

Абсолютная влажность насыщенного паром воздуха называется его **влажностью**:

$$\rho_n = \frac{p_n}{R_n T}. \quad (4)$$

Влажность воздуха очень важное понятие в процессе сушки древесины. Влажность существенно зависит от температуры. Чем выше температура, тем больше влажность. Зависимость влажности воздуха от температуры приведена в приложении 1.

Относительная влажность (степень насыщенности) воздуха ϕ – это отношение парциального давления водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре:

$$\phi = \frac{p_n}{p_n}. \quad (5)$$

Величину относительной влажности часто выражают в процентах. Поскольку $0 \leq p_n \leq p_n$, то $0 \leq \phi \leq 100 \%$, но в сушке принято выражать величину степени насыщенности в долях, то есть $0 \leq \phi \leq 1,0$. Таким образом, для абсолютно сухого воздуха $\phi = 0$, а для воздуха, насыщенного водяным паром, $\phi = 1,0$. Ненасыщенный воздух стремится к состоянию насыщения путем испарения влаги из древесины, а когда достигает его, сушка прекращается, то есть, если $\phi = 1,0$, испарения влаги в воздух не происходит, такой воздух не способен сушить.

Влагосодержанием называют отношение массы пара, содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха. Величину влагосодержания выражают в граммах влаги на 1 кг сухого воздуха.

Для влажного воздуха, находящегося под атмосферным давлением, влагосодержание d , г/кг, определяется по формуле:

$$d = 622 \frac{p_n}{p_a - p_n}, \quad (6)$$

где p_a – атмосферное давление, равное 10^5 Па.

Из уравнения (7) следует, что парциальное давление водяного пара, P_a , во влажном воздухе:

$$p_n = \frac{p_a d}{622 + d}. \quad (7)$$

Плотность влажного воздуха представляет собой общую массу воздуха и водяного пара в единице объема. Плотность влажного воздуха ρ , кг/м³, определяют по формуле:

$$\rho = \frac{28,96 p_a - 10,94 p_n}{8314 T}, \quad (8)$$

$$T = t + 273,$$

где T – термодинамическая температура, К;

t – температура воздуха, °С.

Отсюда следует, что с увеличением парциального давления пара, то есть с увеличением влажности воздуха, плотность его уменьшается. Таким образом, влажный воздух всегда легче, чем сухой.

Приведенный удельный объем влажного воздуха, м³/кг, то есть объем, занимаемый 1 кг смеси воздуха и водяного пара, можно определить по формуле:

$$V = 4,62 \times 10^{-6} T (622 + d). \quad (9)$$

Количество тепла, содержащееся в 1 кг воздуха, называется **теплосодержанием** воздуха или **энтальпией**, I , кДж/кг.

Теплосодержание (энтальпия) влажного воздуха I , кДж/кг, определяется по формуле:

$$I = t + 0,001 d (1,93 t + 2490). \quad (10)$$

2. *Id*-ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Определить параметры влажного воздуха можно графически, пользуясь *Id*-диаграммой (прил. 2). Она позволяет экономить время при выполнении инженерных расчетов, а также очень удобна при анализе процессов изменения состояния воздуха.

Кривая линии постоянной относительной влажности $\phi = 1$ делит *Id*-диаграмму на две части. Верхняя область диаграммы (выше линии $\phi = 1$) характеризует состояние ненасыщенного воздуха и занимает большую часть ее площади. Нижняя часть диаграммы, расположенная под линией $\phi = 1$, называется зоной тумана. Такое состояние воздуха говорит о том, что он полностью насыщен, и происходит процесс конденсации пара.

Кроме линий относительной влажности воздуха ϕ , на *Id*-диаграмму нанесены следующие семейства линий: изотермы $t = \text{const}$, характеризующие температуру воздуха; линии теплосодержания (энтальпии) $I = \text{const}$

расположены под углом 171° к вертикали; вертикальные линии влагосодержания $d = \text{const}$, с которыми совпадают линии постоянного парциального давления водяного пара $p_n = \text{const}$; семейства прямых с постоянными значениями плотности воздуха $\rho = \text{const}$ и приведенного удельного объема $V = \text{const}$.

Каждой точке на Id -диаграмме соответствует определенное состояние влажного воздуха. Чтобы найти нужную точку, надо знать как минимум два параметра воздуха, после чего остальные параметры легко определяются. На рисунке 1 показано, как для состояния воздуха, характеризуемого точкой A , находят значения температуры, энтальпии, влагосодержания и парциального давления водяного пара. Величину относительной влажности, плотности и приведенного удельного объема определяют в зависимости от расположения точки A относительно двух смежных линий $\phi = \text{const}$, $\rho = \text{const}$ и $V = \text{const}$.

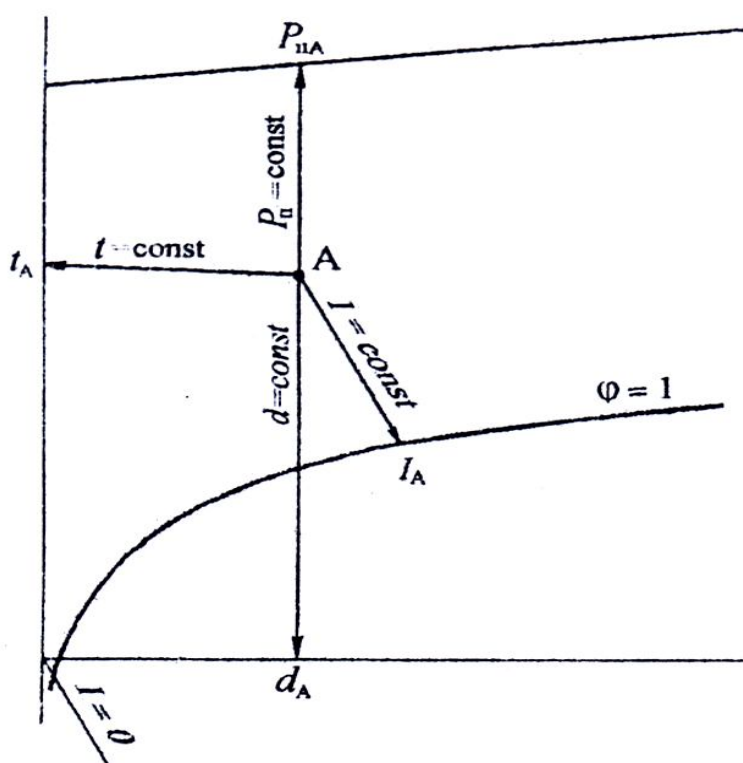


Рис. 1. Определение параметров влажного воздуха с помощью Id -диаграммы

Процессы изменения состояния воздуха во время сушки

Гидротермическая обработка древесины сопровождается, как правило, изменением параметров обрабатывающих агентов. Наиболее характерными процессами изменения состояния воздуха являются нагревание и охлаждение, испарение влаги с поверхности древесины, смешивание воздуха различных состояний.

Нагревание или охлаждение воздуха при контакте с горячей или холодной сухой поверхностью происходит без изменения его влагосодержания ($d = \text{const}$). Остается постоянным и парциальное давление водяного пара ($p_n = \text{const}$). При нагревании температура и энтальпия воздуха возрастают, а относительная влажность и плотность уменьшаются. Охлаждение воздуха сопровождается обратным изменением этих параметров. На Id -диаграмме процессы нагревания и охлаждения воздуха отображаются линиями $d = \text{const}$. На рисунке 2 отрезок 1–2 показывает процесс нагревания воздуха от состояния 1 до состояния 2, а отрезок 1–3 – охлаждение исходного воздуха до состояния 3. Если продолжать охлаждение, то воздух может достичь состояния насыщения ($\phi = 1$), которому на рисунке 2 соответствует точка 4. Температура, при которой это произойдет, называется **температурой точки росы** $t_{\text{тр}}$.

Дальнейшее охлаждение воздуха, насыщенного паром, будет сопровождаться конденсацией из него влаги, что приводит к уменьшению влагосодержания при постоянном значении относительной влажности $\phi = 1 = \text{const}$ (отрезок 4–5). При этом разность влагосодержаний ($d_4 - d_5$) покажет количество влаги (g), сконденсировавшейся из 1 кг воздуха при охлаждении его в состоянии насыщения.

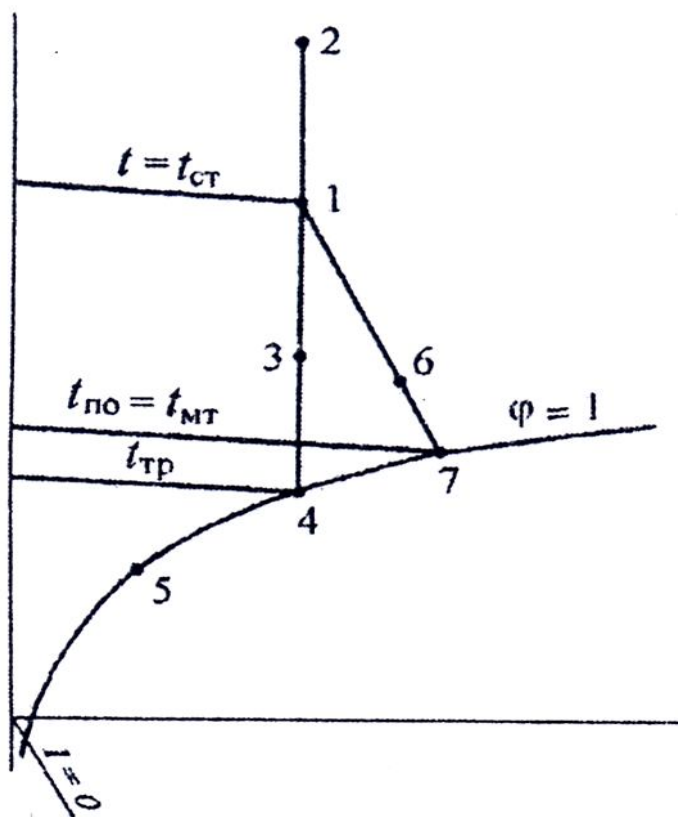


Рис. 2. Изображение на Id -диаграмме процессов нагревания, охлаждения и испарения воды

Испарение влаги в воздух происходит, если он не насыщен паром и контактирует с поверхностью воды или влажного тела. Энтальпия (теплосодержание) воздуха при протекании этого процесса остается неизменной ($I = \text{const}$), так как энергия, затрачиваемая на испарение, остается в воздухе в виде скрытой теплоты парообразования. Происходящее изменение состояния воздуха изображается на Id -диаграмме (рис. 2) отрезком 1–6 прямой линии $I = \text{const}$. Температура воздуха при испарении воды понижается, то есть воздух охлаждается, испаряя влагу из древесины, а влагосодержание, относительная влажность и плотность возрастают. Если процесс испарения воды в воздух продолжается достаточно долго, то воздух может стать насыщенным водяным паром. Температура, при которой воздух, испаряя влагу, достигает состояния насыщения, называется **температурой предела охлаждения** t_{no} . Температура предела охлаждения может быть непосредственно измерена смоченным термометром (термометром, обернутым влажной тканью). Смоченный термометр в совокупности с обычным (сухим) образует прибор, который называется **психрометром**. По показаниям сухого ($t_{cm} = t$) и смоченного ($t_{mm} = t_{no}$) термометров психрометра, используя Id -диаграмму, легко определить все параметры воздуха. Для этого находят точку пересечения изотермы $t_{mm} = \text{const}$ с линией $\phi = 1$ (точка 7 на рисунке 2). От этой точки проводят линию $I = \text{const}$ до ее пересечения с изотермой $t_{cm} = \text{const}$. Полученная при этом точка 1 и будет характеризовать искомое состояние воздуха.

При смешивании воздуха двух разных состояний образуется смесь, параметры которой зависят от состояния и количества смешиваемых компонентов. Отношение массы воздуха состояния 1 M_1 к массе воздуха состояния 2 M_2 называется коэффициентом пропорции смеси:

$$n = \frac{M_1}{M_2}. \quad (11)$$

Для вычисления параметров смеси составляют уравнения баланса тепла и влаги. Очевидно, на 1 кг воздуха в состоянии 2 приходится n кг воздуха в состоянии 1, поэтому:

$$I_2 + nI_1 = (1 + n)I_{cm}, \quad (12)$$

где I_{cm} – теплосодержание (энтальпия) смеси, кДж/кг.

$$d_2 + nd_1 = (1 + n)d_{cm}, \quad (13)$$

где d_1, d_2 – влагосодержание воздуха состояний 1 и 2, г/кг;

d_{cm} – влагосодержание смеси, г/кг.

Из этих выражений непосредственно определяют параметры смеси:

$$I_{cm} = \frac{I_2 + nI_1}{1 + n}, \quad (14)$$

$$d_{см} = \frac{d_2 + nd_1}{1 + n}, \quad (15)$$

где I_1, I_2 – энтальпия воздуха состояний 1 и 2, кДж/кг.

Из уравнений (8) и (9) в результате преобразований получаются выражения для расчета коэффициента пропорции смеси:

$$n = \frac{d_2 - d_{см}}{d_{см} - d_1} = \frac{I_2 - I_{см}}{I_{см} - I_1}. \quad (16)$$

Процесс смешивания воздуха двух состояний может быть проиллюстрирован с помощью Id -диаграммы (рис. 3). Точка 3, характеризующая состояние смеси, всегда находится на прямой, соединяющей точки 1 и 2, которые соответствуют состоянию смешиваемых компонентов. При этом она располагается ближе к точке, характеризующей состояние преобладающего в смеси компонента.

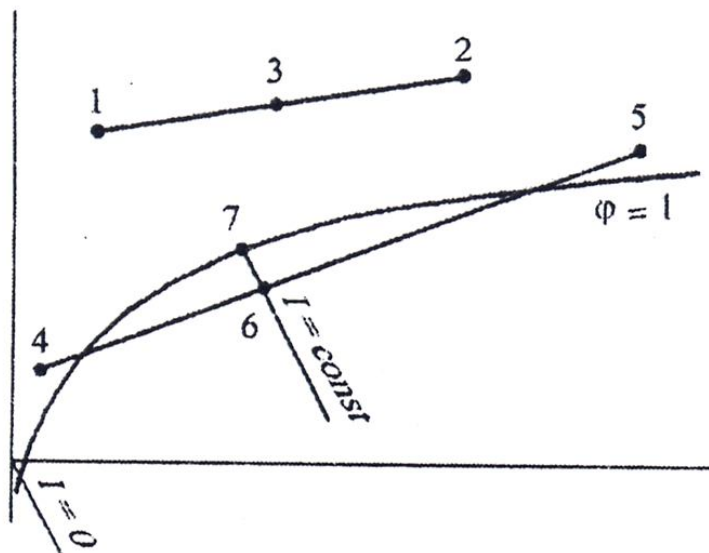


Рис. 3. Изображение на Id -диаграмме процесса смешивания воздуха двух состояний

При смешивании может возникнуть ситуация, когда ненасыщенный воздух двух состояний 4 и 5 (рис. 3) образует смесь, характеризуемую точкой, расположенной на Id -диаграмме ниже линии $\phi = 1$ (точка 6). Это значит, что в процессе смешивания происходит частичная конденсация пара, сопровождаемая образованием тумана. Действительное состояние смеси (после удаления из воздуха конденсата) будет соответствовать точке 7, расположенной на пересечении линии $\phi = 1$ и прямой $I = \text{const}$, проходящей через точку 6.

В случае смешивания воздуха трех и более состояний, построение процесса на диаграмме выполняют последовательно, смешивая по два

компонента и прибавляя следующий к точке смеси двух предыдущих. Например, смешиваются три компонента воздуха, тогда мы найдем точку смеси 1-го и 2-го компонентов смеси и смешаем ее с третьим компонентом аналогично тому, как показано на рисунке 3.

3. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА В КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛКАХ

Газообразный сушильный агент в процессе сушки древесины претерпевает ряд изменений своего состояния. Характер этих изменений зависит от принципиальной схемы сушилки, которая, в свою очередь, определяется видом сушильного агента и кратностью его циркуляции. С учетом этих признаков различают воздушные и газовые сушилки с однократной циркуляцией сушильного агента, воздушные и газовые сушилки с многократной циркуляцией, паровые сушилки.

Принципиальные схемы воздушных сушилок представлены на рисунке 4.

Наиболее простой является схема воздушной сушилки с однократной циркуляцией (рис. 4, а). Согласно этой схеме, атмосферный воздух состояния 0 поступает в калорифер. Здесь он нагревается, приобретая состояние 1. Нагретый воздух вступает в контакт с высушиваемым материалом и, испаряя из него влагу, вновь изменяет свои параметры. Отработавший воздух в состоянии 2 полностью удаляется в атмосферу.

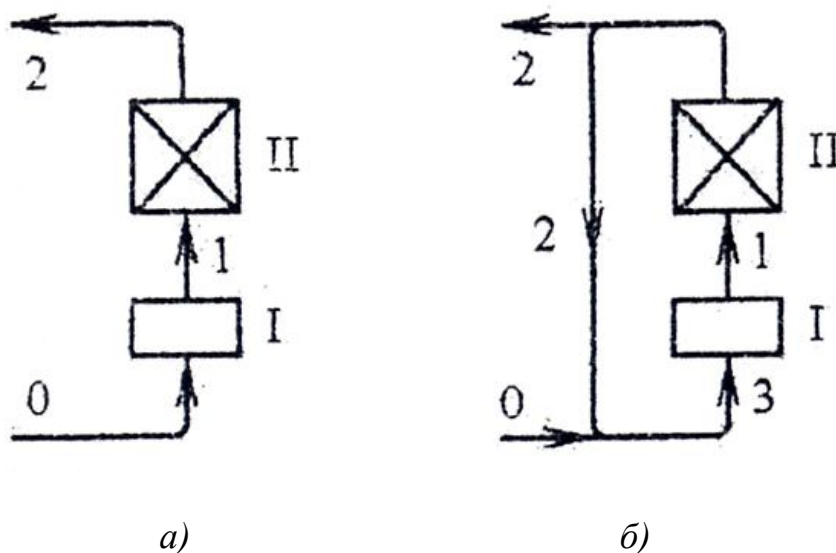


Рис. 4. Принципиальные схемы воздушных сушилок с однократной (а) и многократной (б) циркуляцией сушильного агента:
I – калорифер; II – высушиваемый материал

Принципиальная схема воздушной сушилки с многократной циркуляцией (рис. 4, б) отличается от уже рассмотренной тем, что отработавший сушильный агент в состоянии 2 удаляется в атмосферу лишь частично. Большая его часть возвращается на повторное использование и перед поступлением в калорифер смешивается со свежим воздухом состояния 0, подаваемым в сушилку. Образующаяся смесь, характеризуемая состоянием 3, поступает в калорифер, где за счет нагревания достигает состояния 1. Далее следует сушка, сопровождающаяся изменением параметров воздуха до состояния 2.

Изображение процессов изменения состояния воздуха в описанных сушилках на I - d -диаграмме показано на рисунке 5.

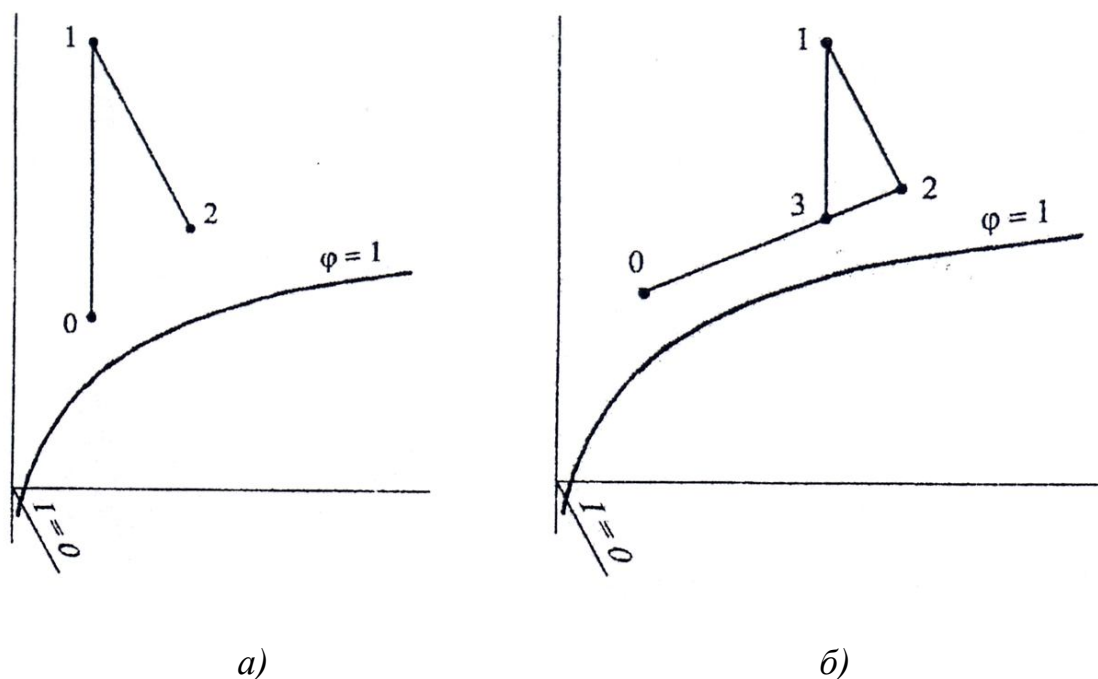


Рис. 5. Изображение на I - d -диаграмме процессов изменения состояния воздуха в сушилках с однократной (а) и с многократной (б) циркуляцией агента сушки

В сушилке с однократной циркуляцией (рис. 5, а) процесс нагревания атмосферного воздуха в калорифере изображается отрезком 0–1, расположенным на линии $d = \text{const}$. При сушке, то есть при испарении влаги из материала, состояние воздуха изменяется по $I = \text{const}$ (линии постоянной энтальпии) 1–2.

Изменение состояния воздуха в сушилке с многократной циркуляцией показано на рисунке 5, б. Смешивание атмосферного воздуха (состояние 0) и отработавшего сушильного агента (состояние 2) с получением смеси, характеризуемой состоянием 3, отображается отрезком 0–3–2. Процессы на-

гревания воздуха в калорифере (3–1) и испарения влаги из материала (1–2) изображаются так же, как и в сушилке с однократной циркуляцией: по линиям $d = \text{const}$ и $I = \text{const}$ соответственно.

По изменению состояния сушильного агента во время сушки могут быть определены затраты тепловой энергии на испарение влаги. Расход теплоты на испарение 1 кг влаги, то есть удельный расход теплоты для воздушных сушилок, $q_{исп}$, кДж/кг, определяется по формуле:

$$q_{исп} = 1000 \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0}, \quad (17)$$

где I_2 и d_2 – энтальпия и влагосодержание отработавшего воздуха, кДж/кг и г/кг соответственно;

I_0 и d_0 – энтальпия и влагосодержание атмосферного воздуха, кДж/кг и г/кг соответственно.

Удельный расход теплоты на испарение влаги легко определить графически с помощью Id -диаграммы. Для этого из начала координат диаграммы проводят луч, параллельный линии, проходящей через точки 0 и 2, соответствующие состояниям атмосферного и отработавшего воздуха. Удельный расход теплоты читается на угловой шкале, нанесенной на полях Id -диаграммы.

Расход свежего воздуха, приходящегося на 1 кг испаряемой влаги L_0 , кг/кг, может быть определен из выражения:

$$L_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0}, \quad (18)$$

где d_2 – влагосодержание агента сушки на выходе из штабеля, г/кг;

d_0 – влагосодержание свежего воздуха, г/кг.

Количество агента сушки, необходимого для испарения 1 кг влаги из материала L_1 , кг/кг, в камере с многократной циркуляцией определяется из отношения:

$$L_1 = \frac{1000}{d_2 - d_3}, \quad (19)$$

где d_2 – влагосодержание агента сушки на выходе из штабеля, г/кг;

d_3 – влагосодержание агента сушки на входе в штабель, г/кг.

Практические задания

Задача 1

Определить расчетным путем неизвестные параметры влажного воздуха (I , d , t , P_n , ϕ , ρ , V_{np}) до и после процесса нагревания, руководствуясь данными таблицы 1.

Таблица 1

Данные к задаче 1

№ варианта	I_0 , кДж/кг	d_0 , г/кг	P_{n0} , Па	t_0 , °C	ϕ_0	Нагревание (до)	
						t_1 , °C	ϕ_1
1	1300	—	—	80	—	98	—
2	—	—	25000	67	—	93	—
3	—	205	—	—	0,85	—	0,28
4	—	—	—	53	0,75	104	—
5	500	—	—	65	—	82	—
6	580	185	—	—	1,0	98	—
7	—	—	19000	—	0,9	85	—
8	—	52	—	42	—	79	—
9	610	—	—	70	—	92	—
10	820	—	—	75	—	89	—
11	—	145	—	60	—	70	—
12	—	—	—	50	0,8	60	—
13	—	100	—	—	0,5	—	0,3
14	—	—	10000	50	—	80	—
15	—	—	8000	42	—	—	0,75
16	—	45	—	40	—	65	—
17	—	—	—	55	1,0	90	—
18	—	—	3500	30	—	—	0,45
19	—	150	—	—	0,8	—	0,35
20	—	85	—	50	—	78	—
21	—	25	—	30	—	70	—
22	—	—	3500	30	—	75	—
23	—	—	—	28	0,65	80	—
24	—	—	9500	58	—	—	0,38
25	—	120	—	60	—	95	—
26	—	120	—	—	0,88	—	0,3
27	—	—	5300	46	—	—	0,2
28	—	59	—	48	—	90	—
29	—	200	—	—	0,98	—	0,45
30	—	—	—	43	0,65	64	—

Задача 2

Воздух с температурой t_1 и степенью насыщенности φ_1 в процессе сушки охладился до температуры t_2 . Используя таблицу 2, определить вла-
госодержание d_2 и степень насыщенности φ_2 в результате этого процесса.
Определить, сколько влаги испарили в себя M , кг воздуха.

Таблица 2

Данные к задаче 2

№ варианта	t_1	φ_1	t_2	M
1	60	0,5	50	80
2	65	0,65	55	90
3	63	0,4	48	85
4	70	0,5	60	83
5	55	0,7	50	58
6	63	0,25	50	100
7	80	0,75	75	90
8	75	0,63	64	105
9	78	0,8	65	200
10	90	0,4	50	92
11	85	0,6	40	89
12	73	0,52	60	130
13	75	0,61	50	140
14	80	0,54	64	98
15	85	0,9	61	103
16	69	0,83	60	94
17	58	0,47	49	69
18	67	0,65	62	205
19	92	0,3	87	187
20	57	0,6	53	93
21	61	0,74	55	145
22	77	0,63	70	167
23	83	0,38	75	91
24	88	0,82	82	108
25	94	0,53	86	69
26	52	0,57	47	128
27	59	0,46	55	107
28	70	0,7	64	95
29	65	0,51	61	94
30	78	0,59	76	100

Задача 3

Воздух, имеющий температуру t_1 и степень насыщенности φ_1 , в количестве M_1 кг, смешали с M_2 кг другого воздуха, имеющего температуру t_2 и степень насыщенности φ_2 . Используя таблицу 3, определить параметры ($I_{см}$, $d_{см}$, $t_{см}$, $\varphi_{см}$) полученной смеси.

Таблица 3

Данные к задаче 3

№ варианта	Параметры первого компонента			Параметры второго компонента		
	t_1	φ_1	M_1	t_2	φ_2	M_2
1	60	0,8	80	30	0,6	10
2	75	0,63	105	35	0,63	15
3	78	0,8	200	40	0,55	40
4	90	0,4	92	60	0,3	23
5	85	0,6	89	25	0,45	9
6	73	0,52	130	36	0,36	12
7	75	0,61	140	29	0,5	16
8	80	0,54	98	19	0,4	5
9	85	0,9	103	24	0,61	25
10	69	0,83	94	41	0,39	6
11	58	0,47	69	23	0,7	10
12	67	0,65	205	26	0,6	26
13	92	0,3	187	29	0,58	30
14	57	0,6	93	17	0,54	31
15	61	0,74	145	28	0,67	18
16	77	0,63	167	32	0,62	34
17	83	0,38	91	34	0,56	21
18	88	0,82	108	27	0,34	15
19	94	0,53	69	32	0,62	23
20	52	0,57	128	35	0,67	24
21	59	0,46	107	29	0,58	28
22	70	0,7	95	25	0,85	29
23	65	0,51	94	34	0,59	33
24	78	0,59	100	36	0,46	22
25	60	0,5	90	39	0,43	17
26	65	0,65	85	31	0,81	11
27	63	0,4	83	26	0,63	9
28	70	0,5	58	37	0,51	8
29	55	0,7	100	16	0,57	28
30	63	0,25	89	19	0,54	24

Задача 4

В сушильную камеру с многократной циркуляцией из атмосферы поступает M_0 воздуха с температурой t_0 и влагосодержанием d_0 . Он смешивается с M_1 отработавшего сушильного агента, температура которого t_1 , а относительная влажность φ_1 . Используя таблицу 4, определить температуру и относительную влажность сушильного агента, поступающего в сушильное пространство. Каким будет удельный расход теплоты на испарение влаги?

Таблица 4

Данные к задаче 4

№ варианта	M_0 , кг/с	t_0 , °C	d_0 , г/кг	M_1 , кг/с	t_1 , °C	φ_1
1	12	34	25	93	61	0,3
2	16	36	10	145	77	0,6
3	5	39	28	167	83	0,74
4	25	31	24	91	88	0,63
5	14	26	20	108	94	0,38
6	10	37	21	69	52	0,82
7	26	16	11	128	59	0,53
8	6	19	12	107	70	0,57
9	31	35	26	95	65	0,46
10	18	40	30	94	78	0,7
11	4	60	56	100	60	0,51
12	21	25	16	90	65	0,59
13	10	36	30	99	63	0,5
14	15	29	18	108	70	0,65
15	40	19	12	69	55	0,4
16	23	24	16	128	63	0,5
17	9	41	22	107	60	0,7
18	12	23	14	95	75	0,25
19	16	26	13	94	78	0,8
20	5	29	18	100	90	0,63
21	25	23	10	90	85	0,8
22	6	26	12	85	73	0,4
23	10	29	16	83	75	0,6
24	26	17	15	58	80	0,52
25	5	28	19	100	85	0,61
26	31	32	20	89	69	0,54
27	8	34	21	116	58	0,9
28	11	27	17	157	67	0,83
29	3	32	19	96	92	0,47
30	7	35	20	117	57	0,65

Задача 5

По данным задачи (табл. 5) найти на I_d -диаграмме точку 0, характеризующую состояние влажного воздуха, определить остальные параметры для нее, построить процесс охлаждения до указанной температуры t_2 . Определить графически параметры охлажденного воздуха (теплосодержание I_2 , влагосодержание d_2 , парциальное давление водяного пара P_{n2} , степень насыщенности водяного пара ϕ_2 , температуру мокрого термометра t_{m2} и температуру точки росы t_{p2}). Если процесс охлаждения сопровождается выпадением конденсата, то определить его количество, приходящееся на 1 кг сухого воздуха.

Таблица 5

Данные к задаче 5

№ варианта	Параметры влажного воздуха до охлаждения					Температура после охлаждения
	I_0 , кДж/кг	d_0 , г/кг	t_0 , °C	P_{n0} , Па	ϕ_0	t_2 , °C
1	—	—	118	41000	—	45
2	—	290	—	—	0,37	28
3	—	120	—	—	0,28	44
4	—	—	—	28000	0,35	36
5	—	—	122	25000	—	43
6	—	—	—	29000	0,35	36
7	—	—	102	—	0,25	49
8	—	—	95	—	0,35	80
9	—	—	—	35000	0,30	32
10	—	—	116	—	0,15	71
11	—	—	120	42000	—	50
12	—	320	—	—	0,30	35
13	—	210	—	—	0,35	25
14	—	—	—	27000	0,40	60
15	—	—	108	—	0,15	72
16	—	—	100	—	0,10	31
17	—	—	120	30000	—	38
18	—	390	—	—	0,20	43
19	—	100	—	—	0,25	50
20	—	35	118	—	—	32
21	720	—	114	—	—	44
22	—	—	100	—	0,30	78
23	—	—	114	—	0,20	90
24	700	—	115	—	—	47
25	—	35	120	—	—	80
26	—	100	—	—	0,20	55
27	—	—	—	29000	0,20	78
28	1200	—	100	—	—	90
29	—	30	125	—	—	44
30	—	—	101	—	0,12	81

Задача 6

По исходным данным одного из вариантов (табл. 6) дать характеристику влажного воздуха, полученного в результате смешения воздуха трех компонентов (найти теплосодержание I , влагосодержание d , температуры по сухому и мокрому термометрам t_c , t_m , температуру точки росы t_p , парциальное давление водяного пара P_n и степень насыщенности водяного пара ϕ).

По условиям задачи построить графики процессов смешения на Id -диаграмме.

Таблица 6

Данные к задаче 6

№ варианта	Параметры первого компонента		Параметры второго компонента		Параметры третьего компонента		Количество смешивающихся компонентов, кг		
	I_1 , кДж/кг	t_{c1} , °C	t_{c2} , °C	t_{m2} , °C	d_3 , г/кг	t_{c3} , °C	G_1	G_2	G_3
1	220	50	110	60	350	100	12	4	1
2	1000	80	50	40	200	120	14	3	1
3	700	96	70	46	400	80	11	4	1
4	260	52	108	68	410	124	1	4	8
5	310	61	52	30	420	80	16	8	1
6	420	60	72	28	430	122	1	3	12
7	320	100	106	70	440	82	8	4	1
8	240	110	54	28	450	100	4	8	1
9	430	82	74	70	460	84	1	3	9
10	330	72	104	72	470	108	14	7	1
11	250	54	76	70	480	86	1	3	5
12	380	99	56	56	490	116	15	3	1
13	440	120	102	74	500	84	2	6	9
14	260	108	78	70	390	105	7	1	3
15	350	79	58	28	395	82	4	3	9
16	450	70	100	68	380	110	10	4	1
17	270	118	68	60	385	80	11	3	1
18	390	100	48	26	370	114	1	4	9
19	460	80	98	66	375	78	7	3	1
20	360	66	70	60	360	112	1	7	15
21	280	101	100	64	365	76	3	6	1
22	230	51	120	69	500	80	4	10	1
23	280	122	90	69	490	82	3	1	6
24	235	52	119	68	480	84	10	1	4
25	275	120	91	68	470	86	1	3	6
26	315	58	118	67	460	88	4	3	1
27	270	118	92	67	450	87	1	3	4
28	265	61	117	66	440	85	1	4	3
29	260	116	93	66	430	83	4	10	2
30	255	114	116	65	420	84	7	2	1

Задача 7

По известным данным одного из вариантов задачи (табл. 7) определить параметры влажного воздуха (теплосодержание I , влагосодержание d , температуры по сухому и мокрому термометрам t_c , t_m , температуру точки росы t_p , парциальное давление водяного пара P_n и степень насыщения водяного пара ϕ), полученного в результате смешения двух компонентов, если известно, что этот воздух участвовал в дальнейшем процессе, указанном в каждом варианте задачи.

Таблица 7

Данные к задаче 7

№ варианта	Параметры первого компонента		Параметры второго компонента		Процесс, в котором участвует смесь двух компонентов	Параметры смеси после про- цесса	
	d_1 , г/кг	t_{c1} , °C	t_{c2} , °C	t_{m2} , °C		t_{c4} , °C	ϕ_4
1	122	100	100	74	Охлаждение	80	0,50
2	130	98	120	73	Испарение	70	0,60
3	135	99	112	72	Испарение	74	0,70
4	140	97	115	74	Охлаждение	68	0,80
5	150	96	119	73	Испарение	72	0,90
6	145	95	117	72	Охлаждение	80	0,55
7	155	94	116	70	Испарение	80	0,60
8	160	93	114	69	Охлаждение	78	0,60
9	50	42	80	74	Нагревание	110	0,15
10	45	44	82	72	Нагревание	108	0,14
11	55	50	81	71	Нагревание	110	0,16
12	40	40	84	70	Нагревание	100	0,20
13	60	55	83	71	Нагревание	98	0,21
14	35	40	86	74	Нагревание	99	0,22
15	65	54	85	73	Нагревание	97	0,21
16	30	35	88	72	Нагревание	90	0,30
17	70	52	87	71	Нагревание	92	0,28
18	25	40	120	72	Охлаждение	72	0,70
19	75	56	82	69	Нагревание	110	0,16
20	20	30	118	72	Испарение	72	0,75
21	80	54	117	71	Испарение	71	0,70
22	15	28	116	70	Охлаждение	80	0,60
23	85	56	115	80	Испарение	69	0,70
24	10	30	114	70	Охлаждение	70	0,70
25	90	60	113	72	Испарение	71	0,90
26	80	50	112	74	Охлаждение	75	0,80
27	95	55	110	70	Охлаждение	70	0,70
28	50	45	108	68	Испарение	65	0,65
29	100	70	104	64	Испарение	75	0,70
30	110	65	100	82	Испарение	80	0,60

Задача 8

Определить L_0 , расход свежего воздуха, и $q_{исп}$ тепла на 1 кг испаряемой влаги в сушильной установке с однократной циркуляцией агента сушки по материалу, если известны параметры свежего воздуха, агента сушки и отработавшего агента сушки (табл. 8). Построить графики процессов сушильного цикла на Id -диаграмме.

Таблица 8

Данные к задаче 8

№ варианта	Параметры свежего воздуха		Температура агента сушки	Параметр отработавшего агента сушки
	t_0 , °C	φ_0	t_1 , °C	φ_2
1	51	0,15	101	0,96
2	54	0,20	104	0,95
3	56	0,35	109	0,80
4	55	0,40	115	0,85
5	57	0,55	114	0,70
6	58	0,60	108	0,75
7	59	0,75	120	0,60
8	60	0,80	120	0,65
9	56	0,95	119	0,70
10	55	0,80	114	0,75
11	54	0,70	117	0,80
12	53	0,90	98	0,85
13	52	0,85	109	0,90
14	62	0,50	113	0,95
15	64	0,55	114	1,00
16	65	0,20	113	0,80
17	66	0,25	112	0,85
18	64	0,30	111	0,90
19	63	0,35	110	0,95
20	62	0,40	119	0,85
21	61	0,45	118	1,00
22	60	0,20	120	0,95
23	59	0,25	121	0,90
24	58	0,30	122	0,85
25	57	0,35	123	0,80

Задача 9

Определить расходы свежего воздуха L_0 , агента сушки L_1 , циркулирующего по материалу, и тепла на 1 кг испаряемой влаги $q_{исп}$ в сушильной установке с многократной циркуляцией, если известны параметры свежего воздуха, агента сушки и отработавшего агента сушки (табл. 9). Построить графики процессов сушильного цикла на Id -диаграмме.

Таблица 9

Данные к задаче 9

№ варианта	Параметры свежего воздуха		Параметры агента сушки			Параметры отработавшего агента сушки	
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0	$t_1, ^\circ\text{C}$	φ_1	$d_1, \text{г/кг}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	φ_2
1	51	0,15	90	—	250	—	0,95
2	54	0,20	95	—	—	76	0,90
3	56	0,35	106	—	240	—	0,95
4	55	0,40	107	0,3	—	—	0,90
5	57	0,55	115	—	260	—	0,95
6	58	0,60	110	0,32	—	—	0,90
7	59	0,75	95	—	390	—	0,95
8	60	0,80	100	—	—	68	0,90
9	56	0,95	112	—	240	—	0,95
10	55	0,80	108	0,20	—	—	0,85
11	54	0,70	100	—	260	—	0,95
12	53	0,90	118	—	—	81	0,80
13	52	0,85	95	—	250	—	0,90
14	62	0,50	116	—	230	—	0,95
15	64	0,55	109	0,19	—	—	0,85
16	65	0,20	95	—	340	—	0,95
17	66	0,25	105	0,25	—	—	0,90
18	64	0,30	102	—	300	—	0,95
19	63	0,35	99	0,3	—	—	0,85
20	62	0,40	104	—	270	—	0,90
21	61	0,45	112	0,18	—	—	0,95
22	60	0,20	104	—	290	—	0,90
23	59	0,25	106	—	320	—	0,85
24	58	0,30	103	—	—	73	0,90
25	57	0,35	98	0,30	—	—	0,95

4. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

В реальных условиях в древесине всегда присутствует влага. Для количественной оценки содержания воды в древесине используют параметр, называемый влажностью. **Влажность (W)** – это отношение массы воды, содержащейся в древесине, к массе абсолютно сухой или влажной древесины, выраженное в процентах. В первом случае влажность называется абсолютной, во втором – относительной.

В технологии деревообработки принято пользоваться абсолютной влажностью, поэтому в дальнейшем под термином «влажность» мы будем подразумевать именно ее:

$$W_{абс} = W = \frac{m - m_0}{m_0} 100, \quad (20)$$

где m – масса сырой (влажной) древесины, кг;

m_0 – масса абсолютно сухой древесины, кг.

Вода, содержащаяся в древесине, подразделяется на связанную и свободную. Свободная вода находится в полостях клеток, в сосудах и в межклеточных пространствах, а связанная – в стенках клеток.

Содержание в древесине связанной воды не может превышать некоторого максимума, который называется пределом насыщения клеточных стенок. **Величина предела насыщения клеточных стенок** зависит от породы древесины, однако различие невелико, поэтому с достаточной для практических расчетов точностью можно принять $W_{nn} = 30 \%$.

Древесина является гигроскопическим материалом. Это означает, что она способна изменять свою влажность в зависимости от температуры и влажности окружающего воздуха.

Влажность, к которой стремится древесина при высыхании или увлажнении в воздухе, называется **устойчивой влажностью**. Достигнуть устойчивого влажностного состояния древесина может двумя путями:

а) поглощая водяной пар из воздуха (сорбция влаги), если ее начальная влажность меньше устойчивой;

б) выделяя водяной пар в воздух (десорбция влаги), если ее начальная влажность больше устойчивой.

Однако для одного и того же состояния окружающего воздуха устойчивая влажность при сорбции будет меньше, чем при десорбции. Разность между ними называется **гистерезисом сорбции**, ΔW , %:

$$\Delta W = W_{yd} - W_{yc}, \quad (21)$$

где W_{yd} – устойчивая влажность при десорбции, %;

W_{yc} – устойчивая влажность при сорбции, %.

Величина гистерезиса сорбции зависит от размера образца древесины. Для измельченной древесины (опилок, стружек) показатель гистерезиса сорбции невелик и составляет $\Delta W = 0,2 - 0,3 \%$, поэтому в случае расчетов для измельченной древесины принимают $W_{yc} = W_{y\partial}$.

С увеличением размеров древесного образца величина гистерезиса сорбции увеличивается, и для образцов, толщина которых более 15 мм и длина более 100 мм, он достигает величины 2,5 % и остается неизменным. Таким образом, для пиломатериалов можно считать величину гистерезиса сорбции постоянной и равной 2,5 %.

Влажность, к которой стремится измельченная древесина при высушивании или увлажнении в воздухе определенного состояния, называется **равновесной влажностью** W_p . Величина равновесной влажности зависит от температуры и влажности окружающего воздуха и может быть определена по диаграмме равновесной влажности (прил. 3).

Связь между устойчивой влажностью сорбции, десорбции и равновесной влажностью зависит от того, подвергалась ли древесина термическому воздействию. Если она сушилась при температуре не более 50–60 °С, то справедливы равенства (%):

$$W_{y\partial} = W_p + \frac{1}{2} \Delta W, \quad W_{yc} = W_p - \frac{1}{2} \Delta W. \quad (22)$$

Для древесины, подвергавшейся длительному воздействию более высокой температуры (камерная сушка), связь между устойчивой и равновесной влажностью будет выглядеть следующим образом (%):

$$W_{y\partial} = W_p, \quad W_{yc} = W_p - \Delta W, \quad (23)$$

Таким образом, при камерной сушке пиломатериалов определять влажность, к которой будет стремиться древесина в воздухе определенного состояния можно используя диаграмму равновесной влажности древесины (прил. 3), считая при этом, что равновесная влажность это и есть та влажность, которую будет стремиться принять древесина, находясь в данном температурно-влажностном состоянии воздуха.

Иначе определить равновесную влажность древесины можно по формуле:

$$W_p = 10,6^\phi (0,0327 - 0,00015 t), \quad (24)$$

где ϕ – относительная влажность воздуха (степень насыщенности);

t – температура воздуха по сухому термометру, °С.

В условиях переменной температуры и влажности древесина изменяет свои размеры. Температурные деформации у нее сравнительно невелики,

в значительно большей степени древесина изменяет свои размеры при колебаниях влажности. Уменьшение линейных размеров и объема древесины, происходящее при снижении влажности, называется **усушкой** (U_c). Обратный процесс увеличения размеров и объема при увлажнении древесины называется **разбуханием**. Следует отметить, что усушка и разбухание имеют место только в том случае, когда в древесине происходит изменение содержания связанной воды. Наличие или отсутствие свободной воды на размерах древесины не сказывается. Усушка и разбухание – процессы обратимые. При повышении или понижении влажности в диапазоне от 0 до W_{nn} изменения размеров древесины одинаковы.

Величина усушки зависит от трех основных факторов:

- 1) структурного направления измеряемого линейного размера;
- 2) величины и диапазона изменения влажности;
- 3) породы древесины.

Влияние на усушку структурного направления линейного размера обусловлено анизотропными свойствами древесины. Наибольшая линейная усушка наблюдается в тангенциальном направлении. В радиальном направлении она в 1,5–2,0 раза меньше. В направлении вдоль волокон усушка незначительна и обычно в расчетах не учитывается.

Влияние на усушку влажности древесины в диапазоне от предела насыщения клеточных стенок до нуля описывается уравнением, %:

$$U_c = k_y (W_{nn} - W_k), \quad (25)$$

где k_y – коэффициент усушки, характеризующий ее величину при изменении влажности на 1 %;

W_{nn} – влажность предела насыщения клеточных стенок, %;

W_k – конечная влажность древесины, %.

Если начальная влажность древесины меньше предела насыщения клеточных стенок, то формула для расчета усушки принимает несколько другой вид, %:

$$U_c = k_y (W_n - W_k), \quad (26)$$

где W_n – начальная влажность древесины, %.

Различные породы древесины имеют неодинаковую способность изменять свои размеры и объем с изменением влажности, то есть у них различный коэффициент усушки. Коэффициенты усушки k_y и разбухания k_p древесины в зависимости от структурного направления волокон приведены в приложении 4.

Для большинства пород коэффициент усушки является функцией параметра, который называется базисной плотностью. **Базисная плотность** – это отношение массы сухого древесинного вещества к объему, занимаемому сырой древесиной. Значения базисной плотности некоторых пород древесины приведены в таблице 10.

Для решения ряда практических и теоретических задач необходимо знать плотность древесины определенной влажности, которая может быть определена при помощи кривых плотности древесины в зависимости от фактической влажности и базисной плотности древесины. **Диаграмма плотности древесины** представлена в приложении 5.

Таким образом, фактическая плотность древесины отличается от базисной плотности на массу влаги, содержащейся в этой древесине.

Тогда, для определения количества влаги ($M_{вл}$), испаряемой из 1 м³ древесины в процессе сушки, справедливо выражение, кг:

$$M_{вл} = \rho_{\delta} \left(\frac{W_n - W_k}{100} \right), \quad (27)$$

где ρ_{δ} – базисная плотность древесины, кг/м³ (табл. 10).

Таблица 10

Значения базисной плотности древесины
некоторых пород

Порода древесины	Базисная плотность, ρ_{δ} , кг/м ³
Береза	500
Бук	530
Вяз	520
Граб	630
Дуб	550
Ель	360
Кедр	350
Клен	550
Липа	400
Лиственница	520
Ольха	420
Осина	400
Пихта	300
Сосна	400
Тополь	400
Ясень	360

Практические задания

Задача 10

В сушильную камеру загружают E , м³, пиломатериалов заданной в таблице 11 породы влажностью W_1 , где они высушиваются до влажности W_2 . Определить массу пиломатериалов M , кг, до и после сушки и количество влаги m , кг, испарившейся из E , м³, пиломатериалов в процессе сушки.

Таблица 11

Данные к задаче 11

№ варианта	Порода древесины	E , м ³	W_1 , %	W_2 , %
1	Сосна	20	80	8
2	Береза	19	85	10
3	Лиственница	18	75	12
4	Дуб	17	70	18
5	Осина	16	60	20
6	Сосна	15	65	10
7	Бук	14	55	8
8	Липа	13	50	10
9	Ель	12	83	12
10	Кедр	11	85	18
11	Пихта	10	80	20
12	Лиственница	10,5	74	12
13	Дуб	11	80	10
14	Осина	20	85	8
15	Бук	16	75	10
16	Липа	15	70	8
17	Ель	14	60	10
18	Сосна	13	65	12
19	Лиственница	12	55	18
20	Береза	11	50	20
21	Осина	20	83	10
22	Тополь	19	85	8
23	Бук	18	80	10
24	Дуб	17	74	12
25	Ясень	16	58	18
26	Сосна	15	74	20
27	Береза	14	67	12
28	Лиственница	10	77	10
29	Дуб	9	89	8
30	Осина	6	80	10

Задача 11

Обрезная доска заданной породы и распиловки при начальной влажности W_n имеет поперечное сечение $S \times b$. Используя таблицу 12, определить толщину и ширину этой же доски, высушенной до влажности W_k .

Таблица 12

Данные к задаче 12

№ варианта	Порода древесины	Характер распиловки	Толщина доски, S , мм	Ширина доски, b , мм	W_n , %	W_k , %
1	Сосна	Радиальная	32	125	65	8
2	Береза	Тангенциальная	40	130	55	10
3	Лиственница	Радиальная	50	150	50	8
4	Дуб	Радиальная	60	150	83	10
5	Осина	Радиальная	25	130	85	12
6	Сосна	Тангенциальная	25	150	80	18
7	Бук	Радиальная	32	200	74	20
8	Липа	Тангенциальная	40	130	80	10
9	Ель	Радиальная	50	150	50	8
10	Кедр	Радиальная	60	125	45	10
11	Пихта	Тангенциальная	25	200	50	12
12	Лиственница	Радиальная	25	125	65	18
13	Дуб	Радиальная	32	150	60	20
14	Осина	Тангенциальная	32	130	65	12
15	Бук	Тангенциальная	40	130	55	10
16	Липа	Радиальная	50	150	50	8
17	Ель	Тангенциальная	60	125	83	10
18	Сосна	Радиальная	25	200	85	8
19	Лиственница	Радиальная	25	200	80	10
20	Береза	Радиальная	32	150	74	12
21	Осина	Тангенциальная	40	130	80	18
22	Тополь	Радиальная	50	130	50	20
23	Бук	Тангенциальная	60	150	45	10
24	Дуб	Радиальная	40	200	50	8
25	Ясень	Радиальная	25	130	65	10
26	Сосна	Тангенциальная	25	150	60	12
27	Береза	Радиальная	32	130	50	18
28	Лиственница	Радиальная	40	125	45	8
29	Дуб	Тангенциальная	50	130	50	10
30	Осина	Тангенциальная	60	150	65	12

5. ВЫБОР РЕЖИМА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Режимом сушки называется расписание параметров сушильного агента.

В зависимости от требований, предъявляемых к качеству древесины, пиломатериалы могут высушиваться режимами различных категорий по температурному уровню (мягкие, нормальные, форсированные).

Кроме того, категория режима сушки определяется, исходя из возможностей проектируемой камеры – максимально возможной температуры в рабочем пространстве камеры. При этом

$$t_{end} \leq t_{max}, \quad (28)$$

где t_{end} – температура последней ступени режима сушки пиломатериалов, °С;
 t_{max} – максимально возможная температура в рабочем пространстве камеры, °С.

Максимально возможная температура в рабочем пространстве камеры зависит от вида теплоносителя, применяемого при сушке пиломатериалов.

При выборе режима сушки пиломатериалов при прочих равных условиях нужно придерживаться **принципа эффективности**, то есть выбирать такой режим, который обеспечит необходимое качество сушки при меньшей ее продолжительности.

Режимы сушки пиломатериалов различных пород приведены в приложении 6–13.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Продолжительность сушки пиломатериалов определяется по формуле

$$\tau_{суш} = \tau_{исх} A_p A_u A_v A_k A_d, \quad (29)$$

где $\tau_{исх}$ – исходная продолжительность сушки пиломатериалов заданной породы, толщины и ширины нормальным режимом в камерах с принудительной реверсивной циркуляцией средней интенсивности (расчетная скорость воздуха 1 м/с, ширина штабеля 1,5–2,0 м), от начальной влажности 60 % до конечной влажности 12 %.

Величина $\tau_{исх}$, ч, определяется по таблице приложения 5.

Коэффициент A_p учитывает жесткость применяемого режима сушки и составляет:

- для мягких режимов 1,7;
- для нормальных режимов 1,0;
- для форсированных режимов 0,8.

Коэффициент A_u учитывает характер и интенсивность циркуляции воздуха в камере и может быть определен по таблице 13 в зависимости от величины произведения $\tau_{исх} A_p$ и скорости циркуляции ω_u .

Коэффициент $A_в$, зависящий от начальной W_n и конечной W_k влажности пиломатериалов, определяется по таблице 14.

Коэффициент A_k , учитывающий длительность влаготеплообработки и кондиционирования древесины в камере, имеет следующие значения:

- для I категории качества сушки – 1,2;
- для II категории качества сушки – 1,15;
- для III категории качества сушки – 1,05;
- для 0 категории качества сушки – 1.

Коэффициент $A_d = 1,0$ для пиломатериалов, для заготовок он зависит от отношения длины материала к его толщине.

Таблица 13

Значение коэффициента A_u для камер с реверсивной циркуляцией

Произведение $\tau_{исх}A_p$, ч	Скорость циркуляции, W_u , м/с			
	1,0	1,50	2,0	2,50
20	1,0	0,78	0,63	0,54
40	1,0	0,81	0,67	0,59
60	1,0	0,84	0,71	0,64
80	1,0	0,85	0,76	0,72
100	1,0	0,88	0,81	0,79
140	1,0	0,92	0,91	0,90
180	1,0	0,96	0,95	0,94
220 и более	1,0	0,99	0,98	0,97

Таблица 14

Значения коэффициента $A_в$

Начальная влажность, W_n , %	Конечная влажность, W_k , %			
	15	12	10	8
80	1,05	1,18	1,29	1,43
70	0,96	1,10	1,21	1,35
60	0,87	1,00	1,11	1,25
50	0,75	0,89	1,00	1,14
40	0,61	0,75	0,86	1,00

7. ПЕРЕСЧЕТ ОБЪЕМА ФАКТИЧЕСКОГО ПИЛОМАТЕРИАЛА В ОБЪЕМ УСЛОВНОГО МАТЕРИАЛА

Поскольку производительность сушильных камер зависит от характеристики подлежащего сушке материала, для планирования и учета их работы установлена учетная единица – **кубометр условного материала**.

Таким образом, как правило, при планировании работы сушильных цехов и расчете производительности сушильных камер весь объем подлежащего сушке пиломатериала необходимо перевести в объем условного материала.

Условному материалу эквивалентны сосновые обрезные доски толщиной 40 мм, шириной 150 мм, длиной более 1 м, высушиваемые по II категории качества от начальной влажности 60 % до конечной 12 %.

Объем подлежащего сушке пиломатериала заданной спецификации Φ (м³) пересчитывается в объем условного материала Y (м³ усл.) по формуле:

$$Y = \Phi K, \quad (30)$$

где Φ – объем подлежащих сушке фактических пиломатериалов данного размера и породы (задается в спецификации), м³;

K – коэффициент пересчета.

$$K = K_t K_e, \quad (31)$$

где K_t – коэффициент продолжительности оборота камеры;

K_e – коэффициент емкости (вместимости) камеры.

$$K_t = \frac{\tau_{об. ф}}{\tau_{об. усл.}}, \quad (32)$$

где $\tau_{об. ф}$ – продолжительность оборота камеры при сушке фактического пиломатериала данного размера и породы, суток;

$\tau_{об. усл}$ – продолжительность оборота камеры при сушке условного материала, суток.

Для камер периодического действия:

$$\tau_{об. ф} = \tau_{суш. ф} + \tau_{загр}, \quad (33)$$

$$\tau_{об. усл} = \tau_{суш. усл} + \tau_{загр}, \quad (34)$$

где $\tau_{суш. ф}$, $\tau_{суш. усл}$ – продолжительность процесса сушки фактического (условного) пиломатериала, сут. [определяется по формуле (29)];

$\tau_{загр}$ – время загрузки и разгрузки камеры (можно принять 0,1 сут.).

Коэффициент емкости (вместимости) камеры определяется отношением коэффициентов объемного заполнения штабеля условным ($\beta_{усл}$) и фактическим материалом ($\beta_{ф}$):

$$K_e = \frac{\beta_{усл}}{\beta_{ф}}. \quad (35)$$

Коэффициент $\beta_{усл}$, или $\beta_{ф}$, равен произведению коэффициентов заполнения штабеля по длине β_o , ширине $\beta_{ш}$ и высоте β_v . С учетом объемной усушки пиломатериалов U_{c0} величина $\beta_{усл}$, или $\beta_{ф}$ находится по формуле:

$$\beta = \beta_o \beta_{ш} \beta_v \frac{100 - U_{c0}}{100}, \quad (36)$$

где $\beta_o \beta_{ш} \beta_v$ – линейные коэффициенты заполнения штабеля по длине, ширине и высоте соответственно;

U_{c0} – объемная усушка древесины, %.

Объемную усушку определяют по формуле:

$$U_{c0} = k_v (W_{ном} - W_{\kappa}), \quad (37)$$

где k_v – коэффициент объемной усушки древесины (прил. 4);

$W_{ном}$ – влажность, для которой устанавливают номинальные размеры по толщине и ширине пиломатериалов, % (можно принять $W_{ном} = 20$ %);

W_{κ} – конечная влажность пиломатериалов, %.

Коэффициент заполнения по длине штабеля β_d показывает отношение средней длины уложенных в штабель пиломатериалов L_{cp} к его длине L .

$$\beta_d = \frac{L_{cp}}{L} \quad (38)$$

Для штабеля пиломатериалов различной длины можно принять $\beta_d = 0,85$. Если длина всех досок в штабеле одинакова ($L_{cp} = L$), то $\beta_d = 1,0$.

Коэффициент заполнения по ширине $\beta_{ш}$ – это отношение суммарной ширины пиломатериалов в горизонтальном ряду штабеля к его ширине. Он зависит от вида пиломатериалов и способа укладки.

Пиломатериал укладывают в штабель со шпациями (расстояниями между досками по ширине штабеля) при естественной и слабой (до 1 м/с) принудительной циркуляции агента сушки по штабелю, а также в случае продольной циркуляции и при атмосферной сушке. Во всех остальных случаях пиломатериал в штабель укладывают без шпаций.

Рекомендуемые для расчетов средние значения $\beta_{ш}$ приведены в таблице 15.

Таблица 15

Значения коэффициента заполнения штабеля по ширине ($\beta_{ш}$)

Способ укладки	Вид пиломатериалов	
	Обрезные	Необрезные
Со шпациями	0,65	0,43
Без шпаций	0,90	0,60

Коэффициент заполнения штабеля по высоте β_v характеризует отношение суммарной толщины пиломатериалов в вертикальном ряду штабеля к его высоте.

$$\beta_v = \frac{S_1}{S_{np} + S_1}, \quad (39)$$

где S_1 – толщина пиломатериалов, мм;

S_{np} – толщина прокладок, мм.

Наиболее часто применяемая толщина прокладок составляет 25 мм.

Если в спецификации на сушку мы имеем несколько пород и типоразмеров пиломатериалов, то для учета общего количества высушиваемого пиломатериала при планировании работы сушильного цеха и расчете производительности сушильных камер, необходимо объем пиломатериалов из каждого пункта спецификации перевести в объем условного материала, а затем сложить их, получив общий объем условного материала ΣU , высушиваемого в цехе (камере) в расчетный период, м^3 усл.:

$$\Sigma U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \dots \quad (40)$$

8. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР

Рассмотрим подробнее, как производить расчет производительности сушильных камер:

1) в фактическом материале:

производительность сушильных камер зависит от породы древесины, начальной и конечной влажности, применяемого режима сушки, а также от размеров подлежащих сушке пиломатериалов. Для материала определенной характеристики ее рассчитывают в кубических метрах древесины за какой-либо период времени по формуле, м^3 :

$$П_{\phi} = \frac{T}{\tau_{об. \phi}} E, \quad (41)$$

где T – период времени, за который определяется производительность, суток;
 $\tau_{об. \phi}$ – продолжительность оборота камеры при сушке фактического пиломатериала данного размера и породы, суток [определяется по формуле (33)];

E – емкость (вместимость) камеры, м^3 .

Емкость (вместимость) камеры E , м^3 , рассчитывается по выражению:

$$E = LBH\beta m, \quad (42)$$

где L, B, H – размеры штабеля (длина, ширина, высота), м;

β – объемный коэффициент заполнения штабеля [формула (36)];

m – число штабелей в камере.

Габаритные размеры штабеля и их количество зависят от технической характеристики сушильной камеры.

Производительность сушильных камер обычно определяют за год. С учетом необходимости технического обслуживания и ремонта камер количество дней работы камеры в году составит, суток:

$$T = 365k_{uc} = 365 \cdot 0,92 = 335, \quad (43)$$

где k_{uc} – коэффициент технического использования камер;

2) в условном материале:

производительность сушильных камер в условном материале может быть определена как произведение Π_{ϕ} на коэффициент пересчета K , м³ усл.:

$$\Pi_{\text{усл}} = \Pi_{\phi} K. \quad (44)$$

Величина пересчетного коэффициента K определяется по формуле (31).

Количество сушильных камер, необходимых для обеспечения сушки за расчетный период всех пиломатериалов из спецификации, рассчитывают по формуле, шт.:

$$N = \frac{\Sigma U}{\Pi_{\text{усл}}}. \quad (45)$$

Практические задания

Задача 12

В таблице 16 дана характеристика пиломатериалов, подлежащих сушке, их назначение и планируемый годовой объем сушки, а также характеристика сушильных камер, в которых планируется сушить данный пиломатериал. По условиям задачи студенту необходимо:

1.1. Выбрать режим и рассчитать продолжительность сушки пиломатериалов в камерах периодического действия.

1.2. Перевести объем фактического пиломатериала, подлежащего сушке, в объем условного материала.

1.3. Определить производительность сушильной камеры в фактическом и в условном материале.

1.4. Определить необходимое количество сушильных камер для выполнения годовой программы сушильного цеха.

1.5. Начертить схему сушильной камеры, расставить в ней штабеля и необходимое оборудование, проставить габаритные размеры камеры.

Задача 13

Определить равновесную влажность древесины W_p (прил. 3) на каждой ступени режима, выбранного для сушки пиломатериалов из таблицы 16. Построить график изменения в процессе сушки равновесной влажности древесины W_p , абсолютной влажности древесины $W_{\partial p}$ и относительной влажности воздуха ϕ . Объяснить их различия и зависимости.

Таблица 16

Данные к задаче 12

№ варианта	Порода	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м	Начальная влажность древесины, %	Теплоноситель * в камере	Скорость циркуляции сушильного агента по штабелю, м/с	Характер циркуляции сушильного агента в камере	Размеры штабеля (пакета), $b \times h \times l$, м	Количество штабелей (пакетов) в камере, шт.	Годовой объем сушки, м ³	Назначение пиломатериалов
1	Сосна	40	150	6,0	70	Горячая вода	1,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×3,0×6,0	1	600	Двери
2	Ель	32	100	4,0–6,0	50	Горячая вода	1,5	Ревверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,6×6,0	2	1000	Детали для музыкальных инструментов
3	Пихта	25	125	3,0–5,0	65	Пар, 0,3 МПа	2,0	Ревверсивная, горизонтально-поперечная	2,0×2,0×5,0	4	2300	Тара
4	Кедр	40	н/обр.	5,50	40	Пар, 0,4 МПа	2,5	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,6×1,4×5,5	2	1050	Окна
5	Осина	25	130	6,50	45	Горячая вода	1,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	2,0×3,0×6,5	1	700	Вагонка
6	Липа	25	100	3,5–6,5	75	Горячая вода	1,5	Ревверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,4×6,5	1	1300	Столярно-строительные изделия
7	Дуб	40	110	3,00	55	Пар, 0,3 МПа	2,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,0×1,0×3,0	9	600	Мебель

Продолжение табл. 16

№ варианта	Порода	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м	Начальная влажность древесины, %	Теплоноситель в камере *	Скорость циркуляции сушильного агента по штабелю, м/с	Характер циркуляции сушильного агента в камере	Размеры штабеля (пакета), $b \times h \times l$, м	Количество штабелей (пакетов) в камере, шт.	Годовой объем сушки, м ³	Назначение пиломатериалов
8	Лиственница	50	180	6,50	80	Горячая вода	1,0	Реверсивная, горизонтально-поперечная	2,2×3,0×6,5	2	750	Доски пола
9	Береза	32	н/обр.	6,00	65	Горячая вода	1,5	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,6×6,0	2	1100	Лыжи
10	Ольха	25	130	3,0–5,0	60	Горячая вода	1,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	2,0×2,0×5,0	1	500	Мебель
11	Бук	50	130	6,50	45	Пар, 0,25 МПа	1,0	Нереверсивная, горизонтально-поперечная	2,2×3,0×6,5	1	430	Лестницы
12	Ясень	40	150	6,00	50	Горячая вода	1,5	Реверсивная, горизонтально-поперечная	1,6×2,8×6,0	2	780	Мебель
13	Сосна	50	180	2,5–4,0	75	Пар, 0,35 МПа	2,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,0×1,0×4,0	6	1000	Мебель
14	Лиственница	40	150	5,50	60	Горячая вода	2,5	Реверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,6×5,5	2	3000	Транспортировка

Продолжение табл. 16

№ варианта	Порода	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м	Начальная влажность древесины, %	Теплоноситель в камере *	Скорость циркуляции сушильного агента по штабелю, м/с	Характер циркуляции сушильного агента в камере	Размеры штабеля (пакета), $b \times h \times l$, м	Количество штабелей (пакетов) в камере, шт.	Годовой объем сушки, м ³	Назначение пиломатериалов
15	Ель	25	110	3,0–5,0	50	Пар, 0,4 МПа	1,0	Реверсивная, горизонтально-поперечная	2,0×3,0×5,0	2	1700	Ящики
16	Береза	25	150	6,00	55	Горячая вода	1,5	Нереверсивная, горизонтально-поперечная	1,8×2,8×6,0	1	650	Лыжи
17	Пихта	40	150	3,5–6,5	40	Горячая вода	2,0	Реверсивная, вертикально-поперечная	2,2×3,0×6,5	1	800	Мебель
18	Ольха	32	130	4,0–6,0	45	Пар, 0,3 МПа	2,5	Реверсивная, горизонтально-поперечная	1,6×2,8×6,0	2	850	Мебель
19	Кедр	25	100	5,50	65	Пар, 0,2 МПа	1,5	Нереверсивная, горизонтально-поперечная	2,0×2,8×5,5	4	1400	Мебель
20	Бук	25	150	5,00	50	Горячая вода	2,0	Реверсивная, вертикально-поперечная	2,0×3,0×5,0	1	900	Столярно-строительные изделия
21	Осина	32	130	3,0–5,0	85	Горячая вода	1,0	Нереверсивная, горизонтально-поперечная	1,0×1,5×5,0	6	2500	Вагонка

Продолжение табл. 16

№ варианта	Порода	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м	Начальная влажность древесины, %	Теплоноситель в камере *	Скорость циркуляции сушильного агента по штабелю, м/с	Характер циркуляции сушильного агента в камере	Размеры штабеля (пакета), $b \times h \times l$, м	Количество штабелей (пакетов) в камере, шт.	Годовой объем сушки, м ³	Назначение пиломатериалов
22	Ясень	50	130	3,5–6,5	70	Горячая вода	1,5	Нереверсивная, вертикально-поперечная	2,0×3,0×6,5	1	450	Двери
23	Липа	22	100	2,0–3,0	75	Пар, 0,35 МПа	2,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,0×1,0×3,0	6	550	Столярно-строительные изделия
24	Дуб	50	130	6,00	60	Пар, 0,4 МПа	2,5	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,6×6,0	1	400	Паркетная доска
25	Сосна	25	н/обр.	6,50	65	Горячая вода	1,5	Реверсивная, вертикально-поперечная	2,2×2,8×6,5	2	1200	Двери
26	Лиственница	25	130	4,0–6,0	90	Пар, 0,2 МПа	2,0	Реверсивная, горизонтально-поперечная	1,8×2,6×6,0	4	800	Столярно-строительные изделия
27	Береза	40	100	6,00	80	Пар, 0,25 МПа	1,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,8×6,0	1	400	Лестницы
28	Бук	40	175	5,50	70	Горячая вода	1,5	Реверсивная, вертикально-поперечная	1,5×1,5×5,5	4	2000	Двери

Окончание табл. 16

№ варианта	Порода	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м	Начальная влажность древесины, %	Теплоноситель в камере *	Скорость циркуляции сушильного агента по штабелю, м/с	Характер циркуляции сушильного агента в камере	Размеры штабеля (пакета), $b \times h \times l$, м	Количество штабелей (пакетов) в камере, шт.	Годовой объем сушки, м ³	Назначение пиломатериалов
29	Сосна	32	125	3,5–6,5	50	Пар, 0,3 МПа	2,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,8×6,5	2	2300	Транспор-тировка
30	Дуб	32	100	5,00	55	Пар, 0,25 МПа	2,5	Реверсивная, вертикально-поперечная	1,5×1,5×5,0	4	460	Мебель
31	Кедр	50	150	4,0–6,0	45	Горячая вода	1,5	Реверсивная, горизонтально-поперечная	1,8×2,6×6,0	4	1500	Вагонка
32	Ясень	25	130	6,00	50	Горячая вода	2,0	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,8×6,0	1	750	Двери
33	Береза	50	н/обр	4,0–6,0	70	Горячая вода	2,5	Нереверсивная, вертикально-поперечная	1,8×2,6×6,0	1	800	Паркетная доска
34	Осина	40	н/обр	5,50	65	Пар, 0,4 МПа	1,5	Реверсивная, вертикально-поперечная	2,0×2,8×5,5	2	1200	Столярно-строительные изделия
35	Липа	40	175	3,5–6,5	60	Горячая вода	2,0	Реверсивная, горизонтально-поперечная	2,2×3,0×6,5	2	1000	Вагонка

* Теплоноситель в камере:

– горячая вода ($t_{\text{вх}} = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вых}} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

– пар: термодинамические свойства водяного пара в состоянии насыщения (табл. 17).

Таблица 17

Термодинамические свойства водяного пара в состоянии насыщения

Давление пара, МПа	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Температура, t_n , °С	99,6	120	127	133	139	144	148	152
Плотность, ρ_n , кг/м ³	0,59	1,13	1,39	1,62	1,87	2,12	2,37	2,62

Точная величина конечной влажности устанавливается техническими условиями на изделия. При решении задач можно руководствоваться данными, приведенными в таблице 18.

Таблица 18

Требования к влажности древесины в изделиях, регламентируемые государственными стандартами

№ п/п	Наименование продукции	Нормативно-технический документ	Величина влажности древесины, %
1	Мебель	ГОСТ 16371-93	8 ± 2
2	Двери деревянные	ГОСТ 475-78	Коробки наружных и тамбурных дверей: 12 ± 3 . Коробки внутренних дверей и дверные полотна: 9 ± 3
3	Щиты перекрытий деревянных для малоэтажных домов	ГОСТ 1005-86	≤ 22
4	Детали профильные для строительства	ГОСТ 8242-88	Детали, эксплуатирующиеся внутри помещений: 12 ± 3 . Детали, эксплуатирующиеся снаружи: 15 ± 3
5	Балки перекрытий деревянные	ГОСТ 4981-87	Балки из цельной древесины: ≤ 20 . Клееные балки: 12 ± 3
6	Ящики	ГОСТ 18573-86; ГОСТ 24634-81; ГОСТ 2991-85	≤ 22
7	Конструкции деревянные клееные	ГОСТ 20850-84	12 ± 3
8	Окна и балконные двери деревянные	ГОСТ 23166-79	Детали, коробок: 12 ± 3 . Створки, фрамуги, форточки, клапаны, жалюзи, обшивки, отливки, нащельники, раскладки: 9 ± 3
9	Щиты покрытий пола деревянные однослойные	ГОСТ 28015-89	8 ± 3
10	Изделия паркетные. Доски паркетные	ГОСТ 862.3-86	8 ± 2
11	Лыжи	ГОСТ 17043-90	10 ± 2
12	Детали для музыкальных инструментов	—	7 ± 1

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Зависимость давления насыщения водяного пара от температуры

Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, P_n , Па	Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, P_n , Па	Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, P_n , Па
1		2		3	
0	610,8	32	4753,6	64	23910,0
1	656,6	33	5029,0	65	25008,0
2	705,4	34	5318,2	66	26148,0
3	757,5	35	5621,7	67	27332,0
4	812,9	36	5940,1	68	28561,0
5	871,8	37	6274,0	69	29837,0
6	934,6	38	6624,0	70	31161,0
7	1001,2	39	6990,7	71	32533,0
8	1072,1	40	7374,9	72	33957,0
9	1147,3	41	7777,2	73	35433,0
10	1227,1	42	8198,3	74	36963,0
11	1311,8	43	8639,0	75	38548,0
12	1401,5	44	9099,8	76	40190,0
13	1496,7	45	9581,7	77	41890,0
14	1597,4	46	10085,4	78	43650,0
15	1704,1	47	10612,0	79	45473,0
16	1817,0	48	11161,0	80	47359,0
17	1936,4	49	11735,0	81	49310,0
18	2962,6	50	12335,0	82	51328,0
19	2196,0	51	12960,0	83	53415,0
20	2336,8	52	13612,0	84	55572,0
21	2485,5	53	14292,0	85	57802,0
22	2642,4	54	15001,0	86	60107,0
23	2807,9	55	15740,0	87	62488,0
24	2982,4	56	16510,0	88	64947,0
25	3166,3	57	17312,0	89	67486,0
26	3360,0	58	18146,0	90	70108,0
27	3563,9	59	19015,0	91	72814,0
28	3778,5	60	19919,0	92	75607,0
29	4004,3	61	20859,0	93	78488,0
30	4241,7	62	21837,0	94	81460,0
31	4491,3	63	22854,0	95	84525,0

Окончание прил. 1

Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, P_n , Па	Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, P_n , Па	Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, P_n , Па
1		2		3	
96	87658,0	126	232090,0	156	543310,0
97	90943,0	127	239320,0	157	557640,0
98	94301,0	128	246740,0	158	572280,0
99	97760,0	129	254340,0	159	587220,0
100	101325,0	130	262130,0	160	602480,0
101	101325,0	131	270120,0	161	618040,0
102	104996,0	132	278300,0	162	633930,0
103	108776,0	133	186680,0	163	650140,0
104	112668,0	134	295270,0	164	666680,0
105	116675,0	135	304060,0	165	683550,0
106	120799,0	136	313060,0	166	700750,0
107	125042,0	137	322270,0	167	718300,0
108	129408,0	138	331710,0	168	736200,0
109	133898,0	139	341370,0	169	754450,0
110	138515,0	140	35125,0	170	773050,0
111	143260,0	141	361360,0	171	792020,0
112	148140,0	142	371700,0	172	811360,0
113	153160,0	143	382280,0	173	831060,0
114	158320,0	144	393110,0	174	851140,0
115	163610,0	145	404180,0	175	871610,0
116	169050,0	146	415500,0	176	892460,0
117	174640,0	147	427070,0	177	913700,0
118	180380,0	148	438900,0	178	935340,0
119	186280,0	149	450990,0	179	957390,0
120	192330,0	150	463340,0	180	979840,0
121	198540,0	151	475970,0	181	1002700,0
122	204910,0	152	488870,0	—	—
123	211450,0	153	502050,0	—	—
124	218150,0	154	515520,0	—	—
125	225030,0	155	529260,0	—	—

Id-диаграмма влажного воздуха

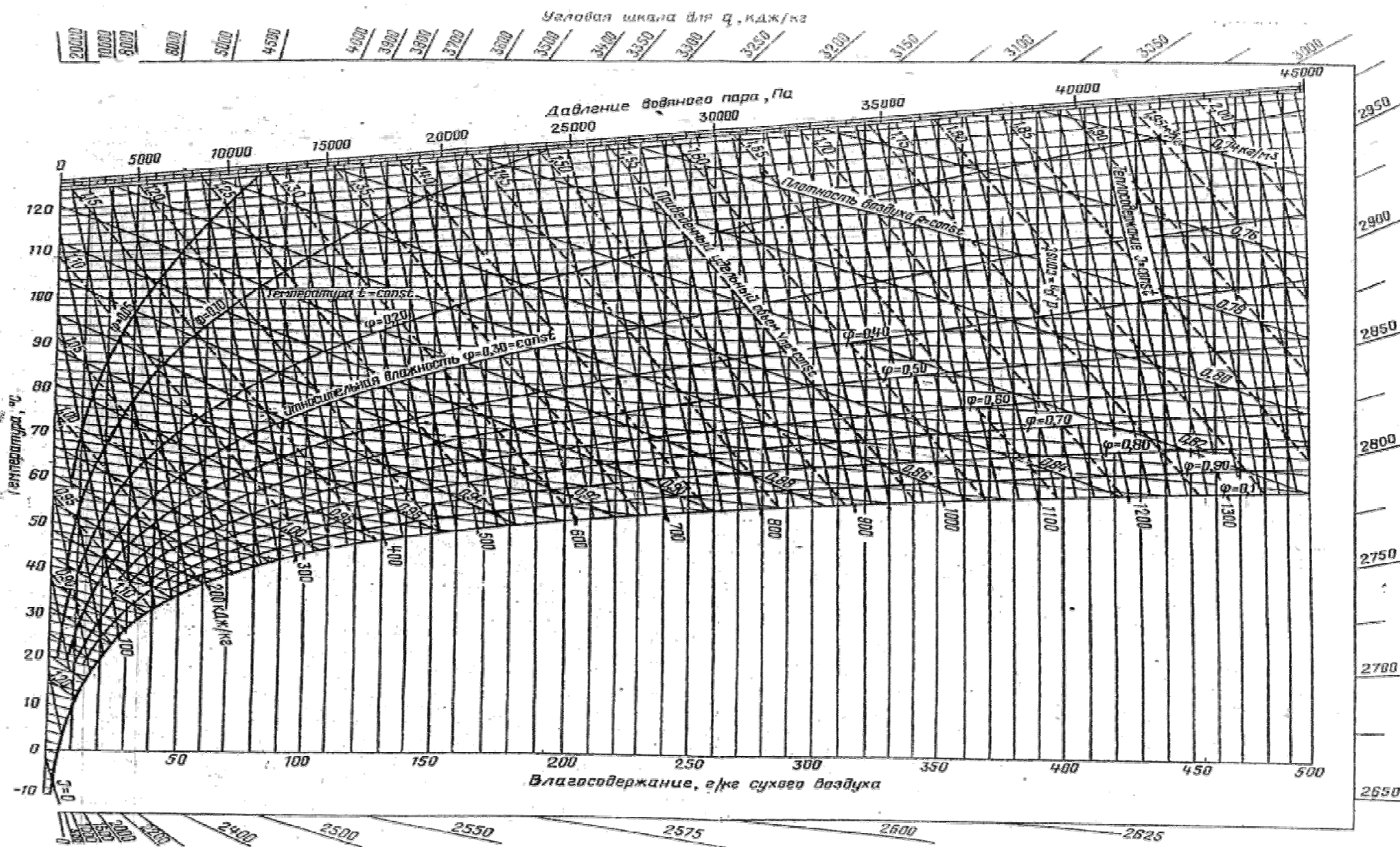
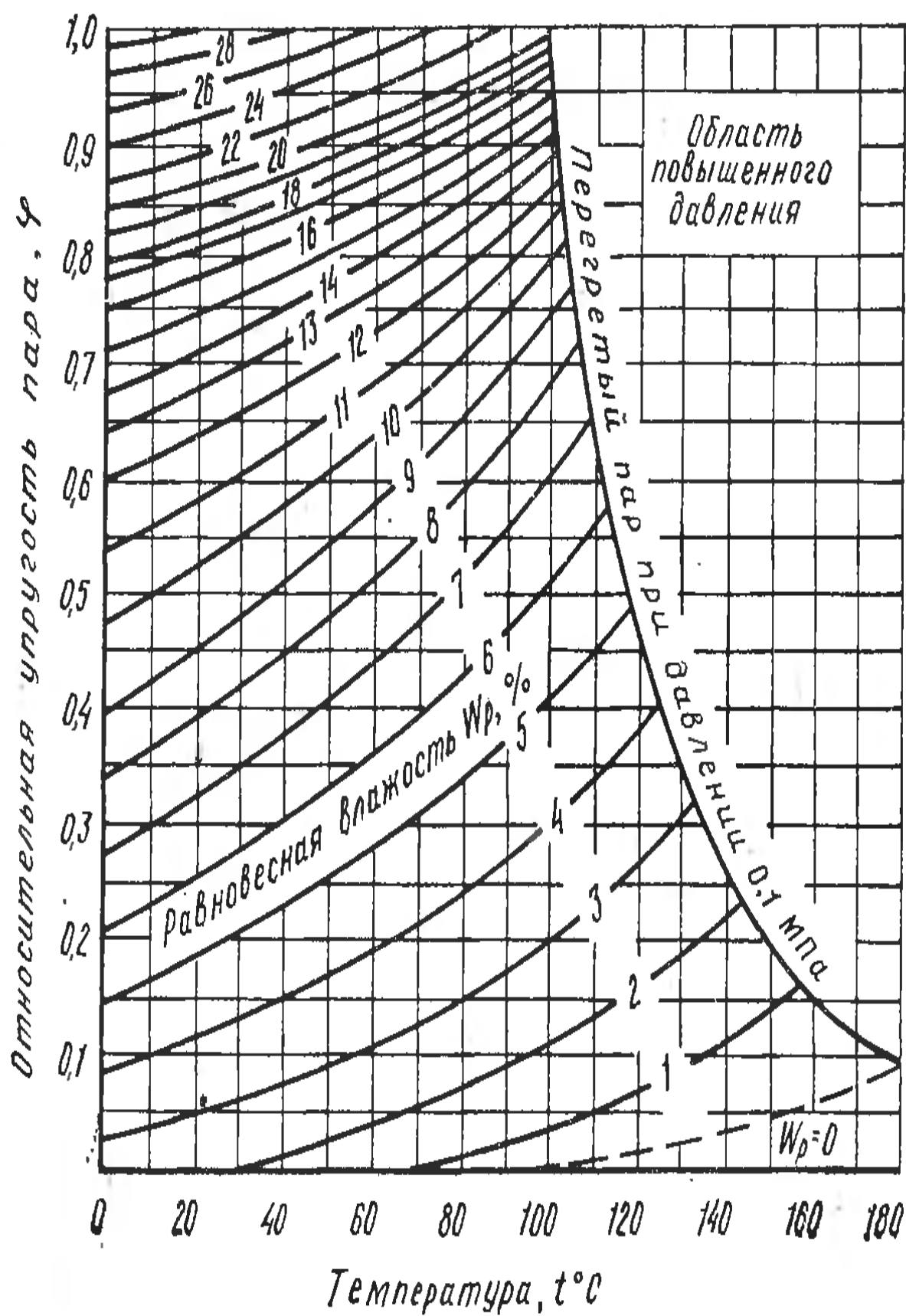


Диаграмма равновесной влажности



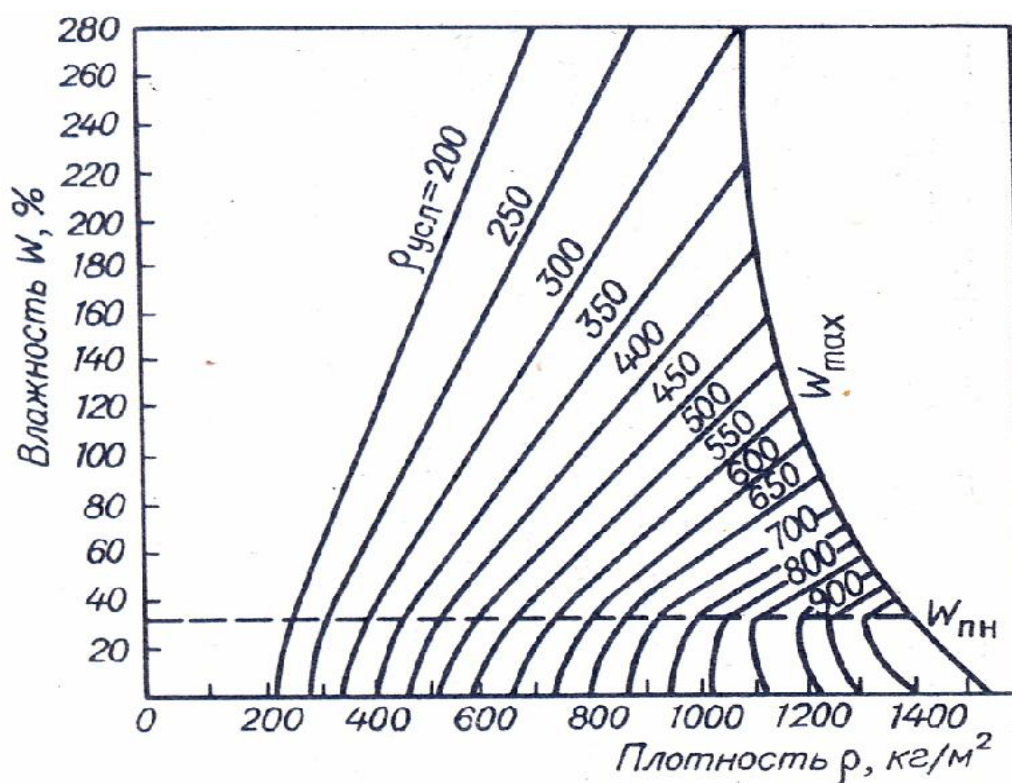
Приложение 4

Коэффициенты усушки и разбухания древесины

Порода	Коэффициент усушки k_y и разбухания k_p , % влажности					
	По объему		По радиальному направлению		По тангенциальному направлению	
	k_y	k_p	k_y	k_p	k_y	k_p
Лиственница	0,52	0,61	0,19	0,20	0,35	0,39
Сосна	0,44	0,51	0,17	0,18	0,28	0,31
Ель	0,43	0,50	0,16	0,17	0,28	0,31
Пихта	0,39	0,44	0,11	0,11	0,28	0,31
Кедр	0,37	0,42	0,12	0,12	0,26	0,28
Береза	0,54	0,64	0,26	0,28	0,31	0,34
Бук	0,47	0,55	0,17	0,18	0,32	0,35
Ясень	0,45	0,52	0,18	0,19	0,28	0,31
Дуб	0,43	0,50	0,18	0,19	0,27	0,29
Осина	0,41	0,47	0,14	0,15	0,28	0,30

Приложение 5

Диаграмма плотности древесины



Приложение 6

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны, ели, пихты, кедра

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Толщина пиломатериалов, мм							
		До 22	Св. 22, до 25	Св. 25, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75	Св. 75, до 100
Мягкие режимы (М)									
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	57, 6, 0,73	57, 5, 0,77	57, 4, 0,81	55, 4, 0,81	55, 4, 0,81	55, 4, 0,81	52, 3, 0,84	52, 2, 0,90
35–20	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	61, 10, 0,59	61, 9, 0,62	61, 8, 0,66	58, 7, 0,69	58, 7, 0,69	58, 7, 0,69	55, 6, 0,72	55, 5, 0,76
< 20	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	77, 26, 0,27	77, 25, 0,29	77, 24, 0,31	75, 24, 0,30	75, 24, 0,3	75, 24, 0,30	70, 21, 0,33	70, 20, 0,35
Нормальные режимы (Н)									
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	83, 9, 0,68	79, 7, 0,73	79, 6, 0,77	75, 5, 0,80	73, 5, 0,80	71, 4, 0,83	64, 3, 0,86	55, 2, 0,9
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	88, 14, 0,55	84, 12, 0,59	84, 11, 0,62	80, 10, 0,64	77, 9, 0,66	75, 8, 0,70	68, 7, 0,71	58, 5, 0,77
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	110, 36, 0,24	105, 33, 0,26	105, 32, 0,27	100, 30, 0,29	96, 28, 0,31	94, 27, 0,32	85, 24, 0,33	75, 22, 0,34
Форсированные режимы (Ф)									
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	94, 11, 0,65	92, 10, 0,67	92, 8, 0,73	90, 7, 0,75	87, 6, 0,78	83, 5, 0,80	73, 4, 0,84	– – –
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	99, 16, 0,54	97, 15, 0,55	97, 13, 0,60	95, 12, 0,62	92, 11, 0,64	88, 10, 0,66	78, 9, 0,66	– – –
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	125, 42, 0,21	123, 41, 0,22	123, 39, 0,24	120, 37, 0,25	115, 36, 0,25	110, 32, 0,29	98, 29, 0,30	– – –

Приложение 7

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины лиственницы

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер						
		Л1	Л2	Л3	Л4	Л5	Л6	Л7
		Толщина пиломатериалов, мм						
		До 22	Св. 22, до 25	Св. 25, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75
Нормальные режимы (Н)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	70, 9, 0,64	70, 8, 0,68	70, 6, 0,76	65, 5, 0,78	60, 4, 0,81	60, 3, 0,86	60, 2, 0,90
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	75, 15, 0,49	75, 15, 0,49	75, 15, 0,49	70, 10, 0,61	65, 9, 0,63	65, 7, 0,71	65, 5, 0,78
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	80, 26, 0,28	80, 25, 0,29	80, 25, 0,30	75, 20, 0,38	70, 19, 0,37	70, 18, 0,39	70, 15, 0,47
Форсированные режимы (Ф)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	90, 9, 0,69	90, 7, 0,75	82, 4, 0,84	75, 4, 0,84	75, 3, 0,87	72, 2, 0,92	70, 2, 0,91
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	98, 12, 0,63	96, 11, 0,65	87, 8, 0,72	80, 8, 0,70	80, 6, 0,77	78, 5, 0,80	76, 4, 0,84
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	112, 32, 0,30	110, 30, 0,32	108, 29, 0,32	100, 28, 0,32	100, 26, 0,35	95, 20, 0,44	90, 18, 0,47

Приложение 8

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины березы

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер						
		Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7
		Толщина пиломатериалов, мм						
		До 22	Св. 22, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75	Св. 75, до 100
Мягкие режимы (М)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	60, 8, 0,65	60, 7, 0,69	60, 6, 0,73	58, 6, 0,73	54, 5, 0,76	48, 4, 0,79	— — —
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	64, 12, 0,54	64, 11, 0,57	64, 10, 0,60	62, 10, 0,59	58, 9, 0,61	52, 8, 0,63	— — —
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	80, 28, 0,25	80, 27, 0,27	80, 26, 0,28	78, 26, 0,27	72, 23, 0,30	64, 20, 0,32	— — —
Нормальные режимы (Н)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	75, 9, 0,66	73, 7, 0,72	70, 6, 0,76	64, 6, 0,74	58, 5, 0,77	52, 4, 0,80	42, 3, 0,83
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	80, 14, 0,53	77, 12, 0,58	75, 11, 0,61	68, 10, 0,61	62, 9, 0,62	54, 8, 0,64	45, 6, 0,69
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	100, 34, 0,23	96, 32, 0,24	92, 29, 0,28	84, 26, 0,29	78, 25, 0,29	72, 22, 0,32	57, 18, 0,34
Форсированные режимы (Ф)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	82, 8, 0,71	80, 7, 0,73	77, 6, 0,77	72, 5, 0,79	— — —	— — —	— — —
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	86, 12, 0,60	84, 11, 0,62	80, 8, 0,70	74, 7, 0,72	— — —	— — —	— — —
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	108, 34, 0,25	104, 31, 0,28	100, 28, 0,32	94, 27, 0,32	— — —	— — —	— — —

Приложение 9

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины ольхи, липы, тополя

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер						
		O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
		Толщина пиломатериалов, мм						
		До 22	Св. 22, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75	Св. 75, до 100
Нормальные режимы (Н)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	74, 6, 0,76	70, 5, 0,79	64, 4, 0,82	62, 4, 0,82	56, 3, 0,84	52, 3, 0,84	42, 2, 0,89
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	80, 11, 0,61	75, 10, 0,64	68, 8, 0,68	66, 7, 0,71	59, 6, 0,73	55, 5, 0,76	45, 4, 0,79
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	100, 30, 0,29	93, 28, 0,30	88, 26, 0,31	83, 24, 0,32	77, 22, 0,34	70, 19, 0,37	56, 15, 0,41
Форсированные режимы (Ф)								
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	82, 7, 0,74	79, 6, 0,77	75, 5, 0,80	70, 4, 0,83	– – –	– – –	– – –
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	87, 11, 0,63	84, 10, 0,65	80, 8, 0,70	73, 7, 0,72	– – –	– – –	– – –
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	108, 32, 0,28	106, 30, 0,30	100, 28, 0,32	91, 26, 0,33	– – –	– – –	– – –

Приложение 10

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины осины

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		Ос1	Ос2	Ос3	Ос4	Ос5	Ос6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		До 22	Св. 22, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75
Нормальные режимы (Н)							
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	78, 11, 0,61	75, 9, 0,66	71, 8, 0,69	66, 7, 0,71	60, 6, 0,73	53, 5, 0,76
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	82, 16, 0,49	79, 14, 0,53	75, 11, 0,60	70, 10, 0,61	65, 9, 0,63	57, 7, 0,69
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	100, 36, 0,20	96, 33, 0,22	92, 31, 0,24	87, 28, 0,28	82, 23, 0,34	72, 18, 0,40
Форсированные режимы (Ф)							
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	85, 10, 0,66	82, 8, 0,71	79, 7, 0,73	73, 6, 0,76	— — —	— — —
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	88, 14, 0,55	85, 12, 0,60	82, 10, 0,65	77, 9, 0,66	— — —	— — —
< 25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	110, 36, 0,24	107, 33, 0,26	102, 30, 0,29	96, 26, 0,34	— — —	— — —

Приложение 11

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины клена, бука

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		К1	К2	К3	К4	К5	К6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		До 22	Св. 22, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	74, 6, 0,76	70, 5, 0,79	64, 4, 0,82	62, 4, 0,82	56, 3, 0,84	52, 2, 0,90
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	80, 10, 0,64	75, 9, 0,66	68, 7, 0,71	66, 6, 0,75	59, 5, 0,77	55, 4, 0,81
25–20	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	100, 29, 0,31	93, 26, 0,33	74, 11, 0,60	72, 10, 0,62	63, 6, 0,74	58, 5, 0,77
20–15	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	100, 29, 0,31	93, 26, 0,33	74, 11, 0,60	72, 10, 0,62	69, 11, 0,58	64, 10, 0,60
< 15	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	100, 29, 0,31	93, 26, 0,33	88, 24, 0,34	83, 23, 0,34	78, 21, 0,36	70, 19, 0,37

Приложение 12

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины ясеня, ильма

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		Я1	Я2	Я3	Я4	Я5	Я6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		До 22	Св. 22, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	60, 4, 0,81	57, 4, 0,81	53, 3, 0,84	50, 3, 0,84	45, 2, 0,89	41, 2, 0,89
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	64, 7, 0,70	61, 6, 0,74	56, 5, 0,76	53, 4, 0,80	47, 3, 0,83	43, 3, 0,83
25–20	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	83, 23, 0,34	77, 22, 0,34	60, 9, 0,61	56, 8, 0,64	51, 5, 0,75	47, 4, 0,79
20–15	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	83, 23, 0,34	77, 22, 0,34	60, 9, 0,61	56, 8, 0,64	54, 9, 0,60	51, 8, 0,63
< 15	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	83, 23, 0,34	77, 22, 0,34	70, 20, 0,35	66, 19, 0,35	65, 18, 0,37	60, 17, 0,37

Приложение 13

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины дуба, граба и ореха

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер					
		Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6
		Толщина пиломатериалов, мм					
		До 22	Св. 22, до 32	Св. 32, до 40	Св. 40, до 50	Св. 50, до 60	Св. 60, до 75
> 35	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	57, 4, 0,81	53, 3, 0,84	50, 3, 0,84	47, 2, 0,89	43, 2, 0,89	38, 2, 0,89
35–25	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	61, 6, 0,73	56, 5, 0,76	53, 4, 0,80	50, 4, 0,80	45, 3, 0,83	41, 3, 0,83
25–20	$t, ^\circ\text{C}$, $\Delta t, ^\circ\text{C}$, φ	77, 22, 0,34	70, 20, 0,35	57, 8, 0,65	55, 7, 0,68	49, 4, 0,79	45, 4, 0,79

Приложение 14

Исходная продолжительность сушки пиломатериалов $\tau_{исх}$ в камерах периодического действия при низкотемпературном процессе

Толщина п/м, S, мм	Ширина пиломатериалов, мм					
	40–50	60–70	80–100	110–130	140–180	Более 180 и необр.
Сосна, ель, пихта, кедр						
До 16	23	25	26	27	27	27
19	29	31	32	33	33	33
22	34	37	39	39	39	39
25	45	50	53	54	55	55
32	59	63	68	72	73	73
40	71	79	84	86	88	88
50	–	93	99	100	104	105
60	–	103	114	122	125	130
70	–	–	147	161	178	194
75	–	–	156	177	197	218
100	–	–	340	354	379	432
Лиственница						
До 16	58	63	64	67	68	68
19	68	72	74	77	77	77
22	75	80	83	86	87	87
25	83	88	91	92	93	94
32	94	99	104	108	110	113
40	113	129	144	157	166	175
50	–	182	224	256	279	304
60	–	235	304	361	400	443
70	–	–	431	521	585	635
75	–	–	466	574	650	757
Осина, липа, тополь						
До 16	29	31	33	34	34	34
19	36	38	39	40	40	40
22	43	45	47	53	54	54
25	59	62	64	66	67	68
32	73	80	84	88	89	91
40	81	87	93	96	99	102
50	–	98	109	116	119	123
60	–	112	128	140	152	164
75	–	–	253	282	311	344

Толщина п/м, S, мм	Ширина пиломатериалов, мм					
	40–50	60–70	80–100	110–130	140–180	Более 180 и необр.
Береза, ольха						
До 16	36	37	37	38	39	39
19	44	45	47	47	48	48
22	50	51	53	54	55	55
25	67	73	78	81	83	84
32	81	85	88	91	92	94
40	93	96	100	101	105	107
50	–	115	130	141	149	158
60	–	155	187	213	231	249
75	–	–	377	420	463	514
Бук, клен, ясень, ильм						
До 16	58	59	61	63	63	63
19	65	68	71	73	73	74
22	73	77	80	81	82	83
25	91	94	96	99	101	102
32	102	109	115	118	120	122
40	114	126	140	152	159	167
50	–	170	199	225	239	255
60	–	250	296	339	367	396
75	–	–	591	657	728	805
Дуб, орех, вяз, граб						
До 16	84	85	86	87	87	88
19	88	91	94	96	96	97
22	97	101	104	105	105	107
25	117	125	132	136	138	140
32	146	173	193	206	214	221
40	183	234	269	293	307	321
50	–	365	431	488	520	551
60	–	562	679	777	841	905
75	–	–	1086	1209	1340	1483



А.Г. Гороховский
Е.Е. Шишкина
В.В. Савина

СУШКА ДРЕВЕСИНЫ. СБОРНИК ЗАДАЧ

Екатеринбург
2013